



**La fragmentation naturelle des massifs rocheux :
modèles de blocs et bases de données tridimensionnelles :
réalisation, exploration géométrique et applications**

Luc Empereur Mot

► **To cite this version:**

Luc Empereur Mot. La fragmentation naturelle des massifs rocheux : modèles de blocs et bases de données tridimensionnelles : réalisation, exploration géométrique et applications. Géologie appliquée. Université de Savoie, 2000. Français. NNT : . tel-00723710

HAL Id: tel-00723710

<https://theses.hal.science/tel-00723710>

Submitted on 13 Aug 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

GÉOLOGIE ALPINE

ÉDITÉ PAR LE LABORATOIRE DE GÉOLOGIE
DE L'UNIVERSITÉ I DE GRENOBLE
(Laboratoire de Géodynamique des Chaînes Alpines)

MÉMOIRE H.S. N° 3 5

LA FRAGMENTATION NATURELLE DES MASSIFS ROCHEUX.
MODÈLES DE BLOCS ET BASES DE DONNÉES TRIDIMENSIONNELLES :
RÉALISATION, EXPLORATION GÉOMÉTRIQUE ET APPLICATIONS

Luc Empereur-Mot



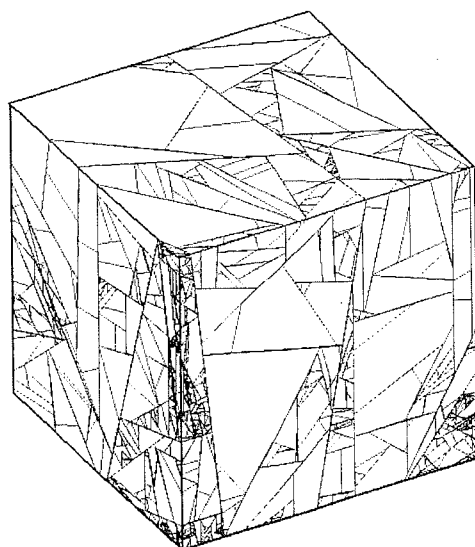
2001

GÉOLOGIE ALPINE

ÉDITÉ PAR LE LABORATOIRE DE GÉODYNAMIQUE DES CHAÎNES ALPINES
DE L'UNIVERSITÉ JOSEPH FOURIER DE GRENOBLE

MÉMOIRE HS N° 35

LA FRACTURATION NATURELLE DES MASSIFS ROCHEUX
MODÈLES DE BLOCS ET BASES DE DONNÉES TRIDIMENSIONNELLES :
RÉALISATION, EXPLORATION GÉOMÉTRIQUE ET APPLICATIONS



2001

Luc Empereur-Mot

10248768

LA FRAGMENTATION NATURELLE DES MASSIFS ROCHEUX

MODÈLES DE BLOCS ET BASES DE DONNÉES TRIDIMENSIONNELLES

RÉALISATION, EXPLORATION GÉOMÉTRIQUE ET APPLICATIONS

Luc EMPEREUR-MOT *

RÉSUMÉ.— La connaissance du milieu fracturé tridimensionnel est basée sur l'observation directe ou indirecte d'extraits, en une ou deux dimensions. Les difficultés de visualisation en 3 dimensions et l'existence constante de nombreuses lacunes géométriques sont un handicap majeur pour la compréhension des lois de comportement complexes du milieu rocheux fracturé. Des modèles numériques dits « équivalents » répondent isolément à une problématique particulière du réseau de fractures (mécanique, hydraulique, thermique). Pourtant, un grand nombre de propriétés physiques du massif rocheux sont conditionnées par la géométrie et la topologie du système de fractures, qui reste une question d'ordre fondamental. C'est de cet aspect essentiel que nous traitons dans notre modèle OBSIFRAC (*modèle OBjet pour la SIMulation de la FRActuration*).

L'observation de sections naturelles justifie que l'on représente, dans un milieu soumis à la seule déformation cassante, les discontinuités par des surfaces planes, interconnectées, sans terminaisons libres, limitant des polyèdres convexes. Dès lors, le réseau de fractures peut être vu comme un assemblage de blocs.

Cette hypothèse nous a permis de construire une base de données tridimensionnelles du réseau, décrivant de façon exhaustive les constituants géométriques de l'assemblage en question (fractures, blocs, faces, arêtes et nœuds).

A partir d'un « germe » ponctuel, le processus de fragmentation affecte un ou plusieurs bloc(s), formé(s) éventuellement de plusieurs polyèdres élémentaires. L'orientation et la position des plans de fractures peuvent être définies de façon stochastique, statistique ou déterministe.

Nous avons développé 4 moteurs de fragmentation, notés A, B, C, et D, qui diffèrent par le protocole de choix du germe d'une part, et par le choix du ou des blocs à diviser d'autre part. Nous présentons pour chaque scénario, une caractérisation descriptive, puis statistique. Les sections réalisées dans les modèles de type A et B évoquent fortement des réseaux naturels. L'algorithme A (fragmentation d'un bloc aléatoire, germe aléatoire au sein de ce bloc) sans imposition de distance interfractionnelle minimale est bien représenté par une loi de Weibull ; il est adapté à la modélisation des réseaux à forte anisotropie de volume. L'algorithme B (germe tiré aléatoirement dans l'enceinte du modèle) correspond à une loi lognormale ; il modélise correctement les réseaux isotropes. L'introduction d'une distance interfractionnelle minimale dans le processus A révèle des propriétés fractales. Nous suggérons que le phénomène mécanique responsable d'une zone d'écrantage autour des fractures existantes joue donc un rôle déterminant dans l'apparition de propriétés fractales dans les réseaux.

Deux applications sont étudiées. La première propose une extrapolation 3D de la fracturation autour d'un puits de forage carotté, dans le granite de Soultz-sous-Forêts. L'utilisation simultanée dans le modèle d'une distribution statistique régionale des orientations, et des fractures de position imposée correspondant aux observations du puits permet la génération d'une fracturation homogène dans un volume limité autour du forage. Ce résultat n'est obtenu que par une alternance de simulations de type A et de type B. Nous avançons l'hypothèse que cette alternance pourrait correspondre à la succession de phénomènes lents, donc plutôt isotropes (type B), et de phases tectoniques ou phénomènes plus rapides, donc plutôt anisotropes (type A).

La seconde application montre à l'aide d'un modèle de friction très simplifié, l'intérêt du modèle dans l'étude de rupture d'équilibre d'un escarpement rocheux. Nous proposons une caractérisation des types de découpage A et B. En présence d'orientations aléatoires, le découpage de type A favorise le phénomène de décollement des blocs instables, mais a tendance à produire des éboulements de moindre volume que le découpage de type B, dans lequel le glissement est majoritaire. Le glissement s'effectue préférentiellement sur les plans des fractures recoupantes.

MOTS-CLÉS.— Fracturation, fragmentation, bloc, modèle numérique, 3D, bases de données, géomatique, géométrie, fractal, Soultz-sous-Forêts, éboulements, instabilités.

* Université de Savoie, Laboratoire de Géodynamique des Chaînes Alpines, Campus Scientifique, 73376 Le Bourget du Lac Cedex.

Thèse préparée à l'Université de Savoie (Laboratoire de Géodynamique des Chaînes Alpines), soutenue le 5 juillet 2000 pour l'obtention du grade de Docteur de l'Université de Savoie, devant la commission d'examen:

J.P. ASTÉ, Examinateur
F. BERGERAT, Rapporteur
R. LAURINI, Rapporteur
P. MASURE, Examinateur
M. TARDY, Examinateur
M. TOMASENA, Invité
T. VILLEMEN, Directeur de Thèse

NATURAL ROCK MASS FRAGMENTATION BLOCK MODELS AND 3D-DATABASES DEVELOPMENT, GEOMETRICAL INVESTIGATION AND APPLICATIONS

ABSTRACT.— Knowledge of the three-dimensional fractured medium is based on direct and indirect observation of one- or two-dimensional extracts. The difficulties of visualization in 3 dimensions and the constant existence of geometrical gaps are major handicaps for the understanding of complex laws ruling fractured rock medium fracturing. Numerical «equivalent» models separately give mechanical, hydraulic, or thermal answers to particular problems of fractured networks. However, a large number of physical properties of the rock solid mass are conditioned by geometry and topology of the fractured system, which remains a fundamental question. Our model OBSIFRAC (OBject SIMulator for rock FRACturing) deals with this essential aspect.

In a brittle deformation context, the observation of natural sections justifies that discontinuities can be represented by plane and inter-connected surfaces, without free terminations, limiting convex polyhedra. Consequently, the network can be seen as a puzzle of blocks.

This assumption enabled us to build a three-dimensional database of the network, which describes in an exhaustive way the geometrical components of the puzzle (fractures, blocks, faces, edges and vertices).

Starting from an initial seed point, the fragmentation process affects one or more blocks, possibly composed of several elementary polyhedra. Orientation and position of the fractured plans can be defined in a stochastic, statistical or deterministic way.

We developed 4 fragmentation engines, denoted A, B, C, and D, which differ by the way the seed point is chosen, and by the choice of the blocks to divide. We present for each scenario, a descriptive, then statistical characterization. The resulting 2D sections carried out in the A and B type models strongly evoke natural networks.

When no minimal distance is imposed between the fractures, the A-type algorithm (random block fragmentation, and random seed point within the chosen block), produces Weibull-like distributions; this algorithm is adapted for modeling networks showing strong anisotropy of volume. The B-type algorithm (random seed point taken in the whole model volume) is likely to produce lognormal volume distributions; it is able to represent isotropic networks. The addition of a compulsory minimal distance between fractures in the A-type processes leads to fractal properties in volume distributions. We suggest that the mechanical phenomenon which is responsible for the absence of discontinuities in the neighbourhood of existing fractures plays a major role in the existence of fractal properties in the networks.

Two applications are studied. The first proposes a 3D extrapolation of the fractured volume around a cored drilling well, in the granite of Soultz-sous-Forêt, France. The model allows the simultaneous use of a regional statistical distribution of orientations, and of a set of imposed fractures corresponding to well observations. This configuration of the model generates a homogeneous fracturation in a limited volume around the well. This result is obtained only by an alternation of simulations of the A and B type. We formulate the hypothesis that this alternation could correspond to the succession of slow, thus rather isotropic phenomena (B type), and of tectonic phases or faster, thus rather anisotropic phenomena (A type).

With a simplified friction model, the second application shows the contribution of the model in studying block equilibrium in a rocky escarpment. We propose a characterization of the A and B division processes. In the presence of random orientations, the A process favors the unsticking phenomenon of unstable blocks, but tends to produce collapses of lesser volume than the B process, in which the major phenomenon is gliding. Gliding preferentially occurs on plans of recoupantes fractures.

KEY WORDS.— Fracturing, fragmentation, block, numerical model, 3D, databases, geomatic, geometry, fractal, Soultz-sous-Forêts, crumbings, instabilities.

AVANT-PROPOS : Les trois objectifs de l'analyse structurale

Au XVIII^{ème} siècle, la grande doctrine unificatrice du neptunisme considérait les ensembles géologiques, du socle à leur couverture sédimentaire, comme un empilement de dépôts successifs dans un océan primitif, initialement chaud et saturé chimiquement, et progressivement disparu (fig 1). La recherche d'un lien entre l'âge et la lithologie fait naître dans ce contexte une science nouvelle, la géognosie [Füchsel, 1761]. Son objet est l'étude purement descriptive des grandes unités lithologiques du sous-sol et de leurs relations mutuelles. Chaque type de roche est le produit caractéristique d'un âge donné de la Terre. Le granite, « formation » la plus basse, donc la plus ancienne représente avec les schistes cristallins le niveau « Primitif », considéré comme le précipité cristallisé primordial.

De cette approche ancestrale, les techniques actuelles de l'analyse structurale ont gardé le même premier objectif, essentiel, celui de la *description de l'organisation géométrique* des milieux géologiques. Pour le tectonicien des milieux cassants, l'accès direct au terrain, complété aujourd'hui par des moyens nouveaux (forages, géophysique, télédétection) satisfait ce souci fondamental de description physique des réseaux de fractures, en une, deux ou trois dimensions.

Partant de la structure étagée qu'il décrivait, Füchsel déduisait une chronologie relative des formations. Une telle démarche d'interprétation génétique des données descriptives, pour tenter de reconstruire l'évolution structurale des corps géologiques est restée d'actualité, même si elle a évolué vers une étude de plus en plus fine des matériaux. Ainsi, l'*analyse cinématique*, second objectif de l'analyse structurale a pour but la reconstitution historique des mouvements qui ont donné à la roche son architecture, sans tenir compte des forces en jeu. Ainsi, à partir de la description d'un réseau de fractures en deux dimensions (plancher de carrière, front de falaise), on peut ordonner dans le temps chaque fracture par rapport à ses voisines, et établir ainsi des familles de fractures, correspondant chacune à une phase génétique distincte.

Le troisième objectif de l'analyse structurale concerne l'*interprétation dynamique* de ces mouvements, qui a pour objet d'établir les relations entre les effets observés et leur cause, et cherche à retrouver la distribution des forces et des contraintes tectoniques qui ont présidé à la mise en place. Après la caractérisation des différentes phases génétiques sur un réseau de fractures, on tente ainsi de rapporter chaque phase à un événement local (circulations fluides par exemple) ou régional (distension régionale par exemple) que l'on cherche à quantifier.

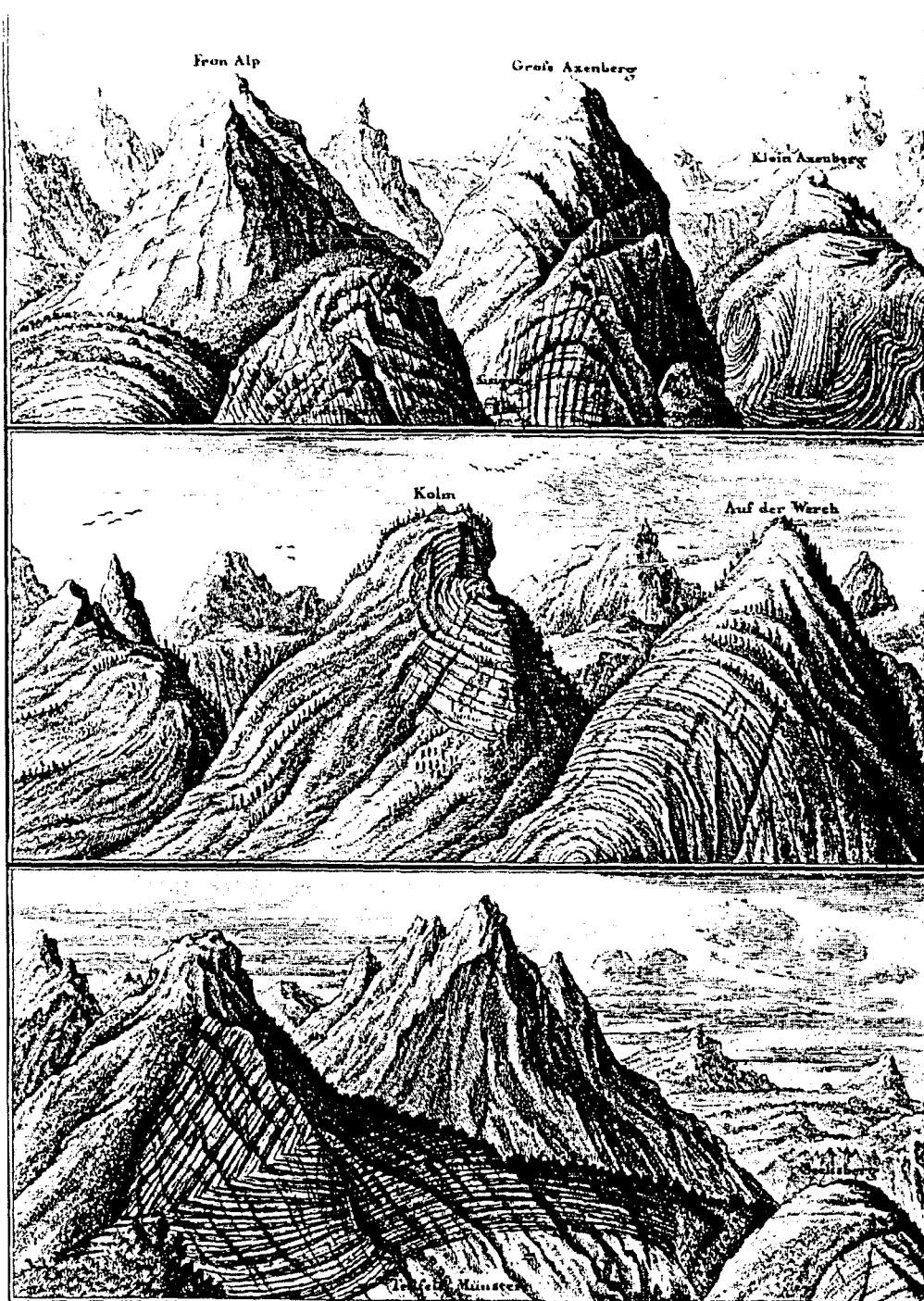


FIG. 1.- Les empreintes du Déluge (« Cataclysmi Reliquia ») sur les sommets des Alpes helvétiques. Planche extraite de Scheuchzer (Physica Sacra, 1731).

INTRODUCTION

1. – LE PROBLÈME POSÉ : MODÉLISER LA FRACTURATION

Le milieu rocheux est un milieu complexe qui est découpé partiellement ou totalement par des discontinuités. Ces discontinuités peuvent être d'origine primaire, pour celles qui se forment en même temps que la roche (joints d'interface dans les strates sédimentaires par ex.) ou secondaire lorsque qu'elles apparaissent postérieurement à la mise en place et la consolidation des matériaux. En introduisant une très forte anisotropie dans les propriétés de la roche, ces interfaces jouent un rôle extrêmement important, tant du point de vue mécanique que de celui de la transmission des fluides à travers la roche. La connaissance de la géométrie tridimensionnelle des discontinuités affectant un volume rocheux constitue donc un enjeu majeur dans beaucoup de domaines de recherche fondamentale et appliquée.

Cependant, le problème posé est complexe à résoudre pour deux raisons principales. En premier lieu, la géométrie du phénomène est complexe : elle est à la fois réellement tridimensionnelle, ce qui implique de fortes difficultés de représentation, et multiscalaire ce qui impose un choix d'échelle dans sa représentation. En second lieu, on s'adresse généralement à des volumes de grande taille, pour lesquels on ne dispose que de moyens d'exploration rudimentaires : aucun outil actuel ne permet de scruter un volume rocheux de manière à permettre une cartographie 3D des discontinuités qui le traverse. Pour résoudre les problèmes posés, on ne peut donc qu'avoir recours à des modèles.

Une première approche suivie par plusieurs auteurs a été de rechercher un équivalent du milieu fracturé, en regard des propriétés étudiées. Une représentation globale du milieu s'avère alors suffisante et il n'est pas nécessaire dans ce cas de connaître précisément la localisation des discontinuités mais simplement les variations globales de propriété qu'elles introduisent. Cette démarche a abouti à la notion de volume élémentaire représentatif [Marle, 1967], fixant ainsi une maille minimale du volume dont les caractéristiques (hydrauliques par ex.) peuvent être résumées par quelques paramètres scalaires simples. Bien que

conceptuellement satisfaisant dans le cadre de l'étude d'un paramètre donné, ce type de modèle se heurte aux difficultés importantes que sont la détermination du volume élémentaire représentatif lui-même et de sa validité.

Il apparaît donc qu'il faut accorder un intérêt tout particulier à l'agencement spatial du réseau de fractures d'une part, et à la géométrie de la fracture elle-même d'autre part, pour rendre compte de comportements complexes, comme par exemple la stabilité des escarpements ou encore la percolation des fluides dans le réseau de fractures en fonction des contraintes qui s'appliquent sur le milieu. Pour cela, les modèles existant donnent des fractures une description plus ou moins simplifiée. Les fractures sont le plus souvent introduites dans les modèles sous la forme de rectangles, de disques, ou encore de plans infinis, mettant à mal le réalisme du réseau de fractures obtenu, et réduisant donc considérablement leur vraisemblance. C'est un premier point que nous avons cherché à améliorer.

Lorsqu'une discontinuité naît en un point donné, une surface de discontinuité, généralement plane en première approximation, se propage dans le matériau. Sa limite est une ligne enveloppe rassemblant un ensemble de points qui, dans le domaine de la déformation cassante qui nous intéresse ici, sont extrêmement instables, au sens où une très faible perturbation du milieu suffit à étendre la discontinuité. Il en résulte que le milieu fracturé aboutit à terme à la disparition de toutes ses terminaisons libres. La fragmentation du milieu est alors complète, la percolation à travers les fractures et autres discontinuités est totale et le milieu peut être vu comme un assemblage de blocs. La vraisemblance de cette vision est confirmée par de nombreuses observations de terrain.

Du point de vue géométrique, il en résulte que chaque discontinuité est limitée par d'autres. Les limites d'une fracture résultent donc de l'agencement des fractures voisines. De cette hypothèse découle la notion de *bloc* qui conduit à considérer le milieu fracturé, non pas comme un espace parcouru par des discontinuités mais comme un assemblage de portions d'espace limitées par les mêmes discontinuités. Le bloc est alors vu comme l'entité ultime du processus de fracturation.

2. – LES OBJECTIFS : UN SGBD « 3D » ET MULTISCALEAIRE POUR LA FRACTURATION

Le présent travail se propose d'élaborer, à partir d'une vision en assemblage de blocs, un outil de modélisation applicable au milieu fracturé. Cet outil doit aboutir à une connaissance tridimensionnelle et multiscaleaire aussi complète et réaliste que possible des discontinuités. Cette connaissance se fera par le biais de la mise en œuvre d'un SGBD pertinent et ouvert vers des évolutions futures. Ce système doit pouvoir proposer des simulations réalistes du milieu fracturé calées sur quelques paramètres simples appréciables *in situ* (loi de distribution des orientations, des espacements, ...). Il doit permettre de tester différents mode de genèse de la fracturation et d'aider à conclure sur leur vraisemblance. Il doit enfin être en mesure de reproduire localement exactement les données observées sur le terrain (dans un ou plusieurs forages par ex.). Dans la mesure où ils existent par ailleurs, on ne s'intéressera pas à développer des outils de visualisation et représentation 3D, ou des modèles élaborés de ce que pourrait être le comportement mécanique ou hydraulique des assemblages simulés. Une application simple à la stabilité d'un assemblage sera néanmoins réalisée afin de tester la potentialité d'une exploitation de la base de données.

3. – LA DÉMARCHE : PLAN DU MÉMOIRE

Une première partie examine la problématique de modélisation des réseaux fracturés (Partie 1, §1), et la réponse qui a été donnée dans les travaux antérieurs (Partie 2, §2). Nous dressons d'abord un inventaire des outils imaginés et réalisés pour rendre compte du comportement des réseaux fracturés, en les rangeant dans leurs familles respectives, modèles « équivalents » ou modèles descriptifs. Nous focalisons ensuite sur les modèles de type descriptif. Parce qu'une description adéquate du milieu fracturé passe par la traduction du phénomène ubiquiste d'invariance d'échelle, nous introduisons à ce stade la géométrie fractale, dont nous rappelons les bases (Partie 1, §3). Puis, en nous adressant plus particulièrement à la fragmentation expérimentale, nous relatons les travaux principaux [Allègre, 1982 ; Turcotte, 1986 ; Sammis *et al.*, 1987] dans lesquels un processus de nature fractale est imposé, engendrant des dimensions fractales variables (Partie 1, §4). En fin de première partie, l'examen de quelques réseaux en coupes suggère qu'il est légitime de concevoir un massif fracturé comme un assemblage de blocs (Partie 1, §5). La fragmentation de blocs trouve dès lors sa place comme processus de fracturation dans un modèle « réaliste » que nous proposons.

Notre modèle, nommé OBSIFRAC, est présenté dans

une seconde partie. Nous abordons dans un premier temps la gestion des données du modèle (Partie 2, §1). La conception, appuyée sur une méthode « orientée objet », puis l'implémentation relationnelle de la base de données sont justifiées. Nous présentons les éléments descriptifs – germe, fracture, bloc, face, arête, nœud – impliqués dans le réseau fracturé (Partie 2, §1.1). Puis dans un second temps, la dynamique du processus de fragmentation est détaillée (Partie 2, §1.2). Nous montrons là comment notre modèle permet de générer à la fois, successivement ou « simultanément », un ensemble de discontinuités dont les orientations sont données par une distribution statistique, et de reproduire des fractures de position déterminée.

Nous abordons ensuite l'exploration du modèle sur le plan théorique (Partie 2, §2). Quatre protocoles de fragmentation des blocs, notés A,B,C,D ont été choisis. Ils sont présentés partie 2, §2.1. Dans le processus A, on fragmente un bloc unique à partir d'un point (« germe ») aléatoire, au sein d'un bloc tiré aléatoirement. Dans le processus B, une fracture, propagée à partir d'un « germe » aléatoire dans l'enceinte du modèle, divise un bloc unique. Le processus C a été choisi parce qu'il réalise un découpage de nature fractale, dans lequel, à chaque étape, chaque bloc a une probabilité p d'être divisé (fractures en salves). A partir de ce processus fractal C, le processus D introduit une composante stochastique, en remettant en jeu les blocs qui viennent d'être divisés.

Les effets de ces processus sur le réseau de blocs produit, et sur les images bidimensionnelles de ce réseau sont ensuite étudiés. Après une première caractérisation descriptive des images bidimensionnelles obtenues par coupes dans les différents réseaux (Partie 2, §2.2), nous présentons une étude comparative des lois statistiques observées pour les quatre types de découpage, en trois, puis deux dimensions (Partie 2, §2.3). L'influence de certains paramètres jouant un rôle majeur y est discutée, dont la distance minimale entre fractures dans les scénarios A et B, et la probabilité de fragmentation dans les processus C et D.

Notre troisième partie est consacrée à deux exemples d'applications.

Le premier exemple choisi pose le problème de l'extrapolation à trois dimensions d'un profil monodimensionnel (Partie 3, Chapitre 1). Il est démontré, sur des données d'un forage du champ géothermique de Soultz-sous-Forêts, que notre modèle apporte une solution à cette question. Celui-ci nous permet en effet de générer un réseau tridimensionnel stochastique dont les orientations statistiques répondent à une distribution locale réelle, réseau qui par ailleurs reproduit, sur le tracé du puits de forage, les fractures qui y sont observées. La méthode permettant d'obtenir une telle compatibilité géométrique avec les observations, en l'occurrence une alternance de processus de A et B, y est ensuite commentée.

A travers un deuxième exemple d'applications (Partie 3, Chapitre 2), nous montrons l'apport d'un modèle de blocs dans le domaine de la stabilité des escarpements. Des hypothèses mécaniques simplifiées sont formulées (glissement seul). A partir d'assemblages de blocs construits avec des fractures répondant à des distributions d'orientations données, nous donnons quelques exemples d'éboulements, dans des contextes de stabilité maximale, puis minimale. Puis nous observons le comportement d'édifices dans lesquels l'orientation des fractures est aléatoire. Enfin, le rôle de deux paramètres majeurs est discuté : il s'agit du caractère recoupant des fractures et du processus de découpage.

4.— CONTRIBUTIONS, RÉSULTATS OBTENUS ET PERSPECTIVES

L'application de notre modèle au domaine géothermique Soultz-sous-Forêts a fait l'objet d'une communication au 4^{ème} Forum international Hot Dry Rock de Strasbourg (28-30 septembre 1998). Actuellement 3 articles sont en préparation. Le premier

prévoit de publier l'aspect informatique du problème dans la revue *Computers and Geosciences*. Le deuxième article est destiné à faire connaître les résultats obtenus à la suite de l'exploration théorique qui a été faite du modèle (Partie 2, § 2). Ce travail est destiné à la revue *Fractals*. Enfin, un troisième article est envisagé sur la démarche d'application faite aux éboulement rocheux. Cet article est prévu pour être soumis aux *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*.

Enfin, le travail réalisé est prévu pour être intégré dans la « plateforme technique de résolution de problèmes appliquée à la chute de blocs en milieu de montagne » [Nicot *et al.*, 2000]. Le développement de cet outil rentre dans le cadre d'un travail commun entre le Laboratoire de Géodynamique des Chaînes Alpines, le CEMAGREF de Grenoble, le Laboratoire L3S de l'Université Joseph Fourier de Grenoble et l'Ecole Centrale de Lyon.

Au delà de ces retombées à court terme, l'outil que nous avons mis au point et dont nous envisageons la diffusion libre permettra à d'autres chercheurs, dont le travail est en rapport avec la fracturation, de disposer d'un outil de simulation 3D multiscalaire de la fracturation.

Univ. J. Fourier - O.S.U.G.
MAISON DES GEOSCIENCES
DOCUMENTATION
B.P. 53
F. 38041 GRENOBLE CEDEX
Tél. 04 76 63 54 27 - Fax 04 76 51 40 58
Mail : platour@ujf-grenoble.fr

PREMIERE PARTIE

MODELISER LA FRACTURATION

1. – LIMITES DE L'ANALYSE STRUCTURALE CLASSIQUE ET INTÉRÊT DE LA MODÉLISATION

1.1. Les difficultés rencontrées

La description géométrique des milieux géologiques, premier objectif cité dans l'avant-propos rassemble l'essentiel de la difficulté de l'analyse structurale.

Depuis les premières utilisations du mot « terrain » en sciences de la terre au XVIII^e siècle, jusqu'aux techniques modernes de la géophysique, de l'imagerie satellitaire ou de la microscopie électronique, la recherche d'une meilleure connaissance spatiale des structures à toutes les échelles est restée la préoccupation majeure des géologues structuraux.

Cette recherche descriptive est rendue malaisée par plusieurs facteurs :

- La diversité naturelle et ses variations locales peut rendre difficile le rattachement d'une observation à un élément-type préétabli. L'absence de stries sur un plan de faille interdira une conclusion quant au jeu qu'elle a subi.
- La description est compliquée par la notion

d'échelle. Certains éléments structuraux ont une « dimension » propre, et ne sont observables qu'à une échelle donnée : les stylolithes apparaissent en lame mince et à l'affleurement, mais pas aux échelles plus larges. A l'opposé, certains paramètres, comme la distribution des fractures peuvent être conservés à travers une gamme importante d'échelles, donnant une invariance d'aspect (auto-similarité) (fig. 2).

- Les structures sont des objets à trois dimensions, et il s'agit de donner de leur géométrie une description aussi précise et fidèle que possible. Or, le plus souvent, l'observation directe est limitée à des vues partielles de l'espace, à la faveur de petites surfaces, naturelles ou artificielles (affleurements, planchers ou murs de carrières) ou de portions linéaires (forages, galeries). On recourt ainsi fréquemment à une quantification locale des structures dans une dimension inférieure à 3, comme en témoignent par exemple les notions de *pendage apparent* d'un plan ou de *rejet apparent* d'une faille.

C'est précisément l'extrapolation, d'une part à une échelle différente de celle de l'observation (plus grande ou plus petite), d'autre part dans une dimension supérieure qui constitue un enjeu fondamental pour l'analyse structurale.

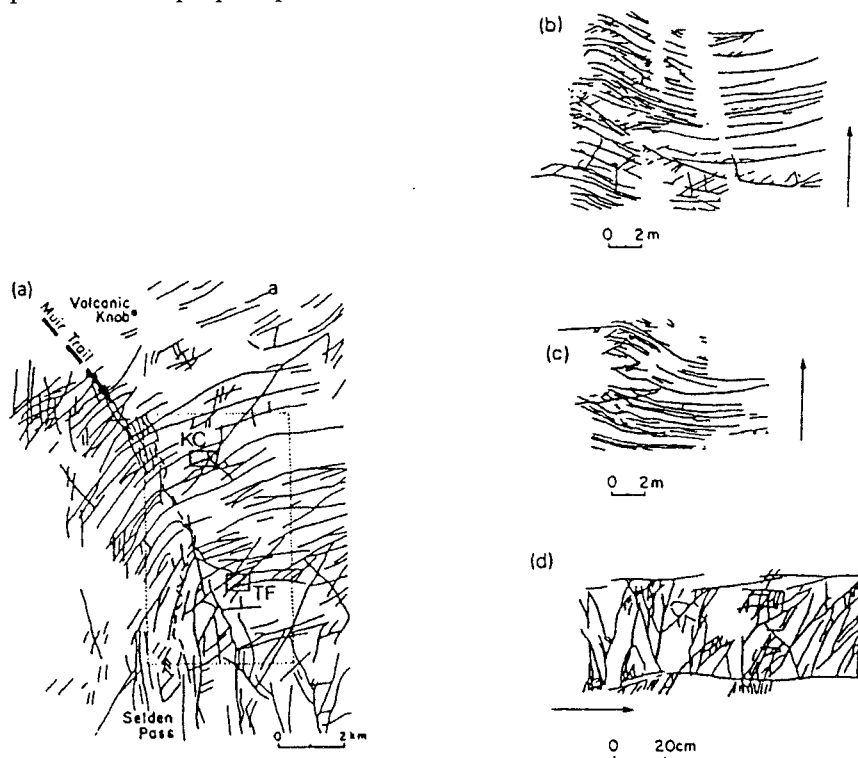


FIG. 2.— Auto-similarité aux échelles kilométrique (a), métrique (b, c) et centimétrique (d). Région du Mount Abbot, Sierra Nevada, d'après [Velde *et al.*, 1991].

1.2. L'apport d'une modélisation

Hall, le premier, a introduit le premier au début du XIX^{ème} siècle la tectonique expérimentale en reproduisant des plissements en modèle réduit. Ses travaux expérimentaux étaient déjà rendus nécessaires par la difficulté d'appréhender un problème sur un objet de grandes dimensions. Dans ce modèle de type analogique, la maquette était facilement soumise à des tests physiques, dont les résultats étaient ensuite mesurés ou observés.

Depuis Hall, le but du modèle en sciences de la Terre n'a globalement pas beaucoup varié. Il s'agit toujours d'examiner un phénomène sous l'angle des causes aux effets : à partir d'un *état initial* I , un *phénomène réel complexe* $\varphi_R(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n)$ dépendant de n variables indépendantes x_1, x_2, \dots, x_n engendre de façon plus ou moins déterministe un *état final* F , que l'observation permet de caractériser.

La détermination de ce phénomène demande que l'on identifie ces variables indépendantes qui représentent à la fois les caractéristiques internes du phénomène et les facteurs extérieurs. Or la tâche est ardue lorsqu'il s'agit de phénomènes mal connus. Ainsi la connaissance exhaustive des paramètres élémentaires de la fracturation est rendue illusoire par la complexité des propriétés géométriques et mécaniques de la roche, du massif, et leurs variations spatiales.

La démarche de modélisation contourne cette difficulté en substituant à ces n variables indépendantes x_i un certain nombre de grandeurs y_i , $i = 1, \dots, m$, $m \leq n$, non nécessairement indépendantes, mais mesurables et manipulables, qui deviendront les paramètres du modèle. On construit ainsi un « phénomène approché » sous la forme d'une fonction de plusieurs variables $\varphi_M(y_1, \dots, y_i, \dots, y_m)$.

Dans une optique de modélisation de la fracturation, on peut envisager une gamme très vaste de paramètres du modèle, correspondant aux très nombreuses caractéristiques observables dans les réseaux de fractures. Selon la préoccupation du chercheur, le choix pourra être fait en faveur de grandeurs plus ou moins spécifiques d'un domaine donné (rhéologie, mécanique,...). A rebours, le modèle conservera un caractère généraliste si ce choix porte sur des variables fondamentales et ubiquistes du réseau de fractures. Notre étude s'inscrit dans cette optique en considérant uniquement les paramètres géométriques du réseau (citons entre autres le nombre de fractures, leur densité, leur orientation, etc...). De façon à positionner la présente étude dans la gamme des outils de modélisation géométrique de la fracturation, il est nécessaire de commencer par présenter les différentes catégories de modèles rencontrés.

2. — INVENTAIRE ET TYPOLOGIE DES MODÈLES DE FRACTURATION

La modélisation de la fracturation a été rendue incontournable par la nécessité de modéliser d'une part les écoulements fluides dans les massifs rocheux, d'autre part la stabilité de systèmes de blocs rocheux en géotechnique. Ces deux types d'applications majeures ont fait naître deux grandes lignées de modèles :

- les modèles « descriptifs », à fondement géométrique et géostatistique, pour lesquels la priorité est la reproduction de discontinuités géométriquement comparables à celles observées sur le terrain. Le but est de *décrire* autant que possible l'hétérogénéité du milieu réel.

- les modèles « équivalents », dont la vocation est d'attribuer au volume considéré un ensemble de propriétés physiques et/ou de lois de comportement mécaniques censées reproduire la réalité. Le but est dans ce cas de *simplifier* l'hétérogénéité du milieu.

De ces deux approches, il faut noter l'importance pratique de la seconde, qui débouche sur toute une catégorie de modèles nécessairement et volontairement simplificateurs, qui simulent un comportement déterminé dans divers domaines, entre autres celui des écoulements hydrauliques. La grande maniabilité de ces modèles a fait leur popularité. Quelques exemples en seront donnés dans la seconde partie de ce chapitre.

Cependant, si historiquement, les modèles « équivalents » ont répondu les premiers à un besoin impérieux, un nombre de travaux de plus en plus grand atteste aujourd'hui d'un nécessaire renforcement de la *capacité descriptive* des modèles de la fracturation. Cette recherche peut alors être conduite selon deux voies :

- une *voie discrète*, qui décrit avant tout les fractures individuelles,

- une *voie statistique*, qui caractérise l'organisation des fractures et le réseau dans son ensemble.

Pour illustrer l'intérêt de la première voie, citons par exemple les travaux de Massonnat *et al.* [1994] sur la perméabilité hydraulique. Dans une recherche de paramètres équivalents pour la modélisation des écoulements, ils étudient la sensibilité de l'anisotropie verticale de perméabilité (rapport K_v / K_h) aux différents paramètres géologiques, entre autres à la densité de fractures d . Le résultat principal de l'étude est l'établissement de courbes théoriques $K_v / K_h = f(d)$. En outre, ces courbes sont conditionnées par le rapport longueur / hauteur de la fracture, qui représente une première approche de la *forme* des fractures. Ce paramètre devrait trouver sa place dans la génération d'objets géologiques par un modèle.

D'autres travaux [Dershowitz, 1984 ; Cacas, 1989] dénoncent le manque d'une description géométrique au niveau de la fracture individuelle. Ces résultats suggèrent l'utilisation de paramètres de type géométrique ou topologique dans les modèles discrets en trois dimensions, piste encore peu suivie actuellement.

La seconde voie, statistique, vise à approfondir la description par la recherche de lois relatives à l'organisation et à la géométrie du réseau. Une avancée majeure a été faite dans ce domaine avec la caractérisation de l'invariance d'échelle dans la fracturation (voir par exemple [Velde *et al.*, 1991 ; Villemain *et al.*, 1994 ; Ouillon *et al.*, 1996] ou encore la mise en évidence d'échelles multiples [Belfield, 1994 ; Ouillon, 1995] par exemple) par la géométrie fractale et multifractale. La traduction expérimentale de cette découverte a été la naissance d'une approche fractale de la modélisation, qui sera présentée plus loin. Mais, plus généralement, les progrès rapides de cette voie de description statistique doivent être inscrits dans la révolution récente de la physique des systèmes non-linéaires dont ils bénéficient largement [Ruelle et Takens, 1971 ; Berge *et al.*, 1988], et qui tend à expliquer comment un chaos apparent - celui du réseau de fractures par exemple - peut être le reflet d'un ordre sous-jacent insoupçonnable à première vue. Ainsi, la physique des états critiques a permis une modélisation satisfaisante de la percolation hydraulique [Broadbent et Hammersley, 1957 ; Wilke *et al.*, 1984 ; Sornette A., 1990 ; Dubois, 1995] et le concept de criticité auto-organisée [Bak *et al.*, 1988] trouve, semble-t-il, des applications en sismologie [Bak et Tang, 1989 ; Sornette A. et Sornette D., 1989 ; Sornette D., 1991].

La voie descriptive discrète a été souvent ignorée de par les moyens importants qu'elle nécessite en puissance et temps de calcul. Elle devient aujourd'hui plus accessible compte tenu des avancées technologiques de l'informatique.

La voie descriptive statistique a été utilisée seule dans nombre de modèles dont on trouvera une revue plus bas. Cependant, la caractérisation du milieu fracturé par les modèles de la physique non-linéaire paraît à ce jour encore trop sommaire et trop incomplète pour être fidèle à la réalité. Il semble donc qu'un couplage des deux méthodes permette de rendre compte à la fois des propriétés physiques avérées des réseaux de fractures et de la géométrie de la fracture.

Conformément à leur apparition chronologique, on envisagera dans un premier temps les modèles « équivalents », dont une revue sera présentée. Dans un second temps, on abordera les modèles descriptifs et leurs résultats principaux, en évoquant l'apport actuel de la physique du chaos.

2.1. Les modèles « équivalents » pour la modélisation des écoulements dans un milieu fracturé

Ce type de modèle a été très tôt imaginé pour représenter un comportement géologique [Bear, 1972 *cité par* Carlier, 1980 ; Long *et al.*, 1982]. La représentation du système fissuré a été faite soit sous la forme d'un milieu unique, soit par deux milieux distincts, dissociant ainsi la matrice et le réseau de fissures.

2.1.1. Le modèle à milieu unique

En hydrogéologie, le « volume élémentaire représentatif » ou VER imaginé par Marle [1967] est tel que l'équation de Darcy liant la vitesse \vec{v} du fluide en circulation à la charge hydraulique h s'applique aux écoulements dans ce volume, comme dans un milieu isotrope de perméabilité K :

$$\vec{v} = -K \cdot \text{grad} \vec{h} \quad (\text{I.1})$$

où K désigne le tenseur de perméabilité du volume considéré. K traduit alors l'hétérogénéité du milieu. Plus généralement, le VER est défini comme le volume minimal pour lequel sont définis les paramètres représentant le milieu continu équivalent. Les deux problèmes posés par cette approche sont alors d'une part la détermination du VER, et d'autre part la qualification et la validation des paramètres équivalents à l'échelle du VER.

Une ébauche de réponse au premier problème évoqué ci-dessus, la détermination du VER, est proposée par Billiaux [1990]. Celui-ci évalue la validité du volume élémentaire représentatif candidat, en comparant sa taille, d'une part à la « dimension caractéristique des mesures », c'est-à-dire au volume couvert lors de l'exploration par les moyens d'investigation utilisés, et d'autre part à celle du problème, c'est-à-dire de la zone d'étude :

- si la taille du VER est inférieure à la dimension caractéristique des mesures et à celle du problème, il est possible d'utiliser un milieu continu équivalent ;
- si la taille du VER est comprise entre la dimension caractéristique des mesures et celle du problème, un milieu continu équivalent peut éventuellement être encore considéré, mais la détermination des paramètres du modèle devient difficile. En effet, dans ce cas les mesures sollicitent un volume inférieur au volume élémentaire représentatif.
- si la taille du VER est supérieure à la fois à la dimension caractéristique des mesures et à celle du problème, le milieu est globalement discontinu et l'hypothèse du milieu continu n'est plus valable.

La seconde question, celle de la détermination des paramètres équivalents au niveau du VER, prend toute son ampleur en milieu fracturé. En effet, la connectivité d'un réseau met en jeu la densité, la forme, l'orientation, le pendage et la taille de fractures élémentaires qui ne

peuvent pas être mesurés, rendant ainsi particulièrement inaccessibles les paramètres équivalents [Long *et al.*, 1985].

Les travaux sur l'homogène équivalent ont diversement justifié leur choix du volume élémentaire représentatif. Carlier [1983] utilise l'expression du tenseur de perméabilité pour un système de fissures d'ouvertures et fréquences différentes, établie par Kiraly [1969] :

$$K = \frac{g}{12\nu} \sum_{i=1}^n f_i a_i^3 (I - \bar{n}_i * \bar{n}_i) \quad (I.2)$$

où g est l'accélération de la pesanteur, $g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$

ν est la viscosité cinématique du fluide,

$\nu = 10^{-6} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ pour l'eau,

i parcourt les n familles de fissures,

a_i est l'ouverture des fissures de la famille i , en mètres,

f_i est la fréquence des fissures de la famille i , en m/m^2 ,

\bar{n}_i est un vecteur orthonormé de la famille de fissures i ,

$*$ est le produit tensoriel défini pour

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad \text{par} \quad \bar{n} * \bar{n} = \begin{pmatrix} x^2 & xy & xz \\ yx & y^2 & yz \\ zx & zy & z^2 \end{pmatrix}$$

I est la matrice identité d'ordre 3, soit

$$I = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Il établit une condition pour laquelle le milieu peut être représenté par un milieu équivalent constitué par 3 familles de fissures correspondant aux directions principales d'anisotropie, donc aux vecteurs propres du tenseur de perméabilité. Si $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ sont les valeurs propres de ce tenseur, cette condition suffisante est:

$$\begin{cases} \lambda_1 + \lambda_2 - \lambda_3 \geq 0, \text{ et} \\ \lambda_1 + \lambda_3 - \lambda_2 \geq 0, \text{ et} \\ \lambda_2 + \lambda_3 - \lambda_1 \geq 0 \end{cases} \quad (I.3)$$

Les termes de l'équation (I.3) sont donnés par :

$$\bar{n}_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \bar{n}_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \bar{n}_3 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

et

$$\begin{cases} f_1 a_1^3 = (\lambda_3 + \lambda_2 - \lambda_1) / 2 \\ f_2 a_2^3 = (\lambda_1 + \lambda_3 - \lambda_2) / 2 \\ f_3 a_3^3 = (\lambda_1 + \lambda_2 - \lambda_3) / 2 \end{cases} \quad [\text{Carlier, 1983}] \quad (I.4)$$

L'application que fait Carlier de ce modèle dans les calcaires de l'Avesnois semble donner satisfaction. L'étude préalable de la fracturation qui est faite dans son travail montre que celle-ci engendre un découpage qualifié de très petit par rapport à la dimension du domaine étudié, ce qui lui permet de justifier le choix de secteurs d'études homogènes et anisotropes. Cependant, aucune quantification plus précise n'a été faite pour attester de la validité de cette hypothèse, en termes, par exemple, de rapport entre le volume moyen des blocs délimités par les fractures utiles et le volume d'étude.

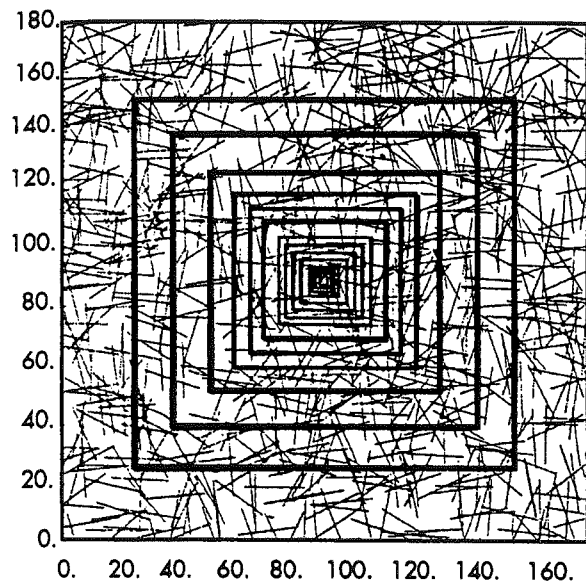


FIG. 3.- Etude de détermination du Volume Elémentaire Représentatif par Long et Witherspoon [1985]. Les différents domaines étudiés dans une image bidimensionnelle d'un réseau de fractures de longueur $L=20 \text{ cm}$.

Une tentative de détermination plus précise du VER a été conduite par Long et Witherspoon [1985] à partir de modèles géostatistiques. Ces auteurs ont utilisé des images bidimensionnelles de réseaux de fissures pour calculer le tenseur de perméabilité, en prenant en compte deux paramètres, la longueur des fissures sur l'image et le volume du domaine d'étude (fig. 3). Les résultats montrent qu'il existe une valeur de la taille du sous-domaine au-dessus de laquelle la perméabilité équivalente est globalement la même que celle du domaine tout entier (fig. 4).

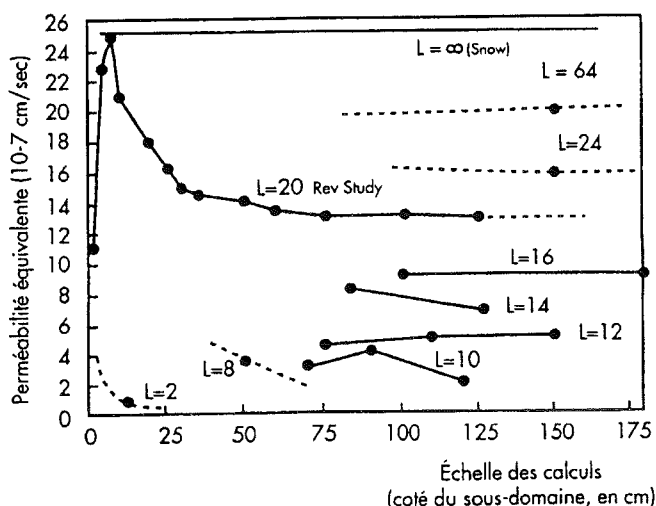


FIG. 4.- Perméabilité équivalente en fonction de la dimension (côté) du domaine étudié, en cm, et de la dimension des fractures. D'après Long et Witherspoon [1985] et Massonnat [1994].

Ainsi, pour des longueurs de fissures de 20 centimètres, le côté du sous-domaine cubique équivalent au sens du tenseur de perméabilité est de l'ordre de 60 centimètres. La figure 4 illustre également l'impact de la longueur des fractures : pour des longueurs de fractures infinies, on obtient un majorant de la perméabilité. Ce résultat correspond à l'approche par fractures infinies due à Snow [1969] exposée plus loin.

2.1.2. Le modèle à plusieurs milieux : le modèle « à double porosité »

Au-delà de la représentation simplifiée par un milieu homogène unique, le besoin est apparu, concomitamment, d'examiner les possibilités offertes par une modélisation impliquant deux systèmes de propriétés mécaniques et/ou hydrauliques distinctes.

Warren et Root [1963] juxtaposent ainsi deux milieux homogènes équivalents très différents (fig. 5) :

- le réseau de fractures le plus conducteur, caractérisé par son espacement dans les trois directions de l'espace, sa faible porosité, sa perméabilité élevée,
- les blocs de la matrice, limités par les fractures, et qui sont caractérisés par leur forme et leur dimension, et possèdent une porosité non négligeable. Ces blocs matriciels peuvent être éventuellement parcourus de fissures dont la dimension, le nombre ou la connectivité sont tels qu'elles ne participent pas de façon significative à l'écoulement.

Le double milieu présente le principal avantage de rendre possible la simulation des échanges entre la matrice et la fracture. Il représente par ailleurs assez correctement la hiérarchisation des écoulements [Massonnat, 1994]. Cependant, le concept de double porosité n'est qu'une variante du principe de l'homogène équivalent [Moench, 1984]. En effet, les deux milieux sont représentés par des Volumes Élémentaires Représentatifs (VER), supposés satisfaire à l'hypothèse du milieu continu, qui ne décrivent pas davantage les détails et l'hétérogénéité de la fracturation. Par ailleurs, le calcul d'un homogène équivalent pour chaque milieu est rendu difficile par la détermination du VER correspondant, et de sa validité.

2.2. Les modèles « descriptifs »

L'observation d'ensemble *in situ* d'un réseau de fractures tridimensionnel par nature est impossible. L'approche est limitée à des segments de droites (fractures en forages par exemple) ou, tout au plus à des portions de surfaces d'affleurement recoupant le réseau de fractures). Dans ce dernier cas, il faut en outre souvent compter avec un biaisage des mesures, dû à la planéité imparfaite des surfaces, aux techniques d'échantillonnage, ou encore aux erreurs de mesure. La difficulté d'obtention des données et leur manque de fiabilité entraîne ainsi une gêne évidente pour identifier

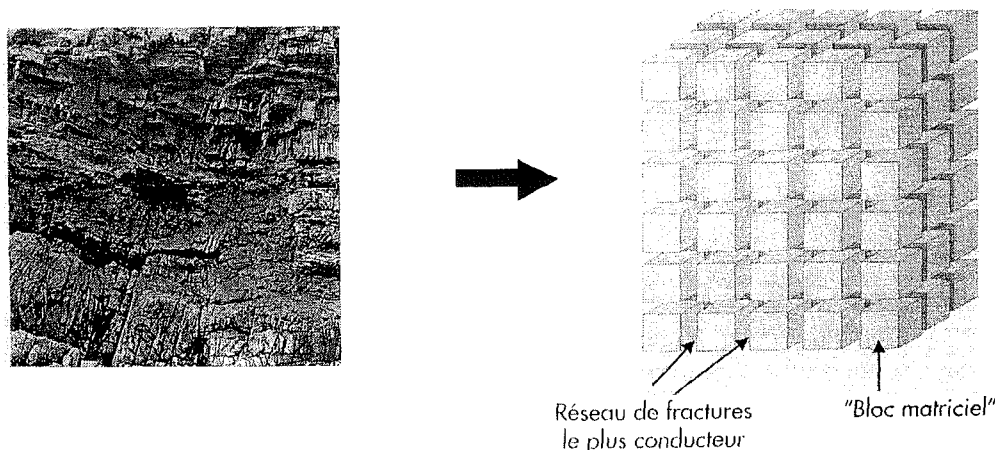


FIG. 5.- Schématisation d'un réseau de fractures par un modèle de type double porosité (D'après Warren et Root [1963] ; Massonnat [1994]).

et quantifier les paramètres d'un modèle tridimensionnel de la fracturation. Il s'ensuit l'obligation de formuler des hypothèses sur la structure géométrique en trois dimensions du système de fractures. Ceci est réalisé en établissant un modèle conceptuel descriptif du réseau.

2.2.1. La description du géologue structuraliste

L'approche la plus descriptive pour la construction d'un tel modèle conceptuel est sans doute celle du géologue de terrain, qui collationne les données concernant les fractures individuelles du réseau. Un bon exemple en est donné par les travaux de Gros et Coppel (*relaté par Billaux [1990, communication orale]*) pour l'étude des massifs granitiques comme lieu de stockage de déchets radioactifs. L'objectif est la connaissance des propriétés mécaniques et géométriques du massif, et le choix de sites d'implantation de forages profonds. Les données sont issues d'analyses de terrain complètes, comprenant levé géologique détaillé, études pétrographique et pétrostructurale, télédétection vérifiée au sol, géophysique et hydrogéologie superficielles, et néotectonique.

Les accidents suprakilométriques sont cartographiés individuellement. Il leur est ensuite affecté un degré de certitude en fonction du résultat des différentes investigations (failles reconnues, probables, possibles, hypothétiques).

La petite fracturation (décimétrique à pluridécimétrique) est définie statistiquement à partir des levés d'affleurement. Les failles sont regroupées en quelques familles d'orientation, auxquelles on affecte un poids relatif. On calcule la densité de fracturation, et on en discute les variations au vu de la nature de la roche encaissante et de la proximité des failles.

Ce modèle présente comme avantage majeur le fait d'inscrire une description aussi exhaustive que possible de la réalité dans l'optique du géologue structuraliste, dont l'intelligence assure la cohérence des interprétations issues des diverses sources de données.

Si l'étude de la grande fracturation au niveau du massif est certainement optimale compte tenu des moyens mis en jeu, la petite fracturation est, avec ce type d'approche, insuffisamment qualifiée et ne permet pas par exemple d'examiner les positions relatives des failles entre elles (connectivité, variations locales) [Billaux, 1990].

2.2.2. Fractures infinies et fractures parallèles

Snow [1969] propose un modèle dans lequel une matrice imperméable est parcourue par n fractures planes d'extension infinie et d'orientation quelconque. Il tente de quantifier ainsi la perméabilité équivalente K d'un cube d'arête a de ce milieu hétérogène par la formule :

$$K = \frac{1}{a} \sum_{i=1}^n e_i k_i R_i \quad (I.5)$$

où, pour chaque fracture i :

e_i est l'épaisseur,

k_i est la conductivité hydraulique,

R_i est une matrice de rotation propre à la fracture.

La détermination des coefficients de la matrice R_i repose sur les données géométriques (direction, pendage, espacement mesurés à l'affleurement, en sondages et galeries) et hydrauliques (essais à l'eau en sondage) des fractures du massif. La valeur de perméabilité ainsi obtenue par ce modèle surestime nettement la valeur obtenue lors d'essais réels sur les mêmes sites. Ce résultat est sans doute imputable au fait qu'une fracture donnée recoupe toutes les autres fractures situées dans des plans non parallèles, entraînant une surévaluation de la connectivité. Par ce modèle destiné au calcul d'un paramètre équivalent, on illustre bien le caractère fondamental de la connaissance géométrique du réseau.

Reiss [1980] prolonge ces travaux en proposant de relier, dans un modèle à fractures parallèles, la perméabilité du réseau, la porosité, l'ouverture et l'espacement des fissures. Il utilise pour cela des abaques (fig. 6 A, B et C), différents selon la structure du réseau : feuilles, blocs ou allumettes

L'approche pratique séduisante rend ces abaques assez faciles à utiliser. Cependant, les valeurs obtenues pour la perméabilité sont, là encore, surestimées. Pour expliquer ce résultat, il faut considérer, outre l'extension infinie des fractures et la connectivité maximale, le fait que dans une fracture, l'écoulement ne s'effectue pas entre deux plans parallèles mais selon des cheminements préférentiels, « chenalisés » [Gentier, 1986].

La distinction que Reiss [1980] est amené à faire pour différentes structures de réseau introduit un paramètre assez subjectif destiné à compenser la simplicité des équations, qui traduit mal la complexité du milieu fracturé. Une modélisation plus poussée de la géométrie du réseau apparaît donc indispensable, tant au niveau du massif qu'au niveau de la fracture.

2.2.3. L'apport de la géostatistique

La voie géostatistique, ouverte essentiellement par Matheron [1965, 1970] se donne pour mission d'estimer la valeur d'une variable régionalisée (densité de fractures, longueur moyenne des fractures par exemple) en tout point d'une région donnée, à partir de valeurs mesurées dans cette région en un nombre fini de points. Elle a été initialement développée dans le domaine minier pour fournir une estimation de la teneur du minerai sur un gisement [Matheron, 1970].

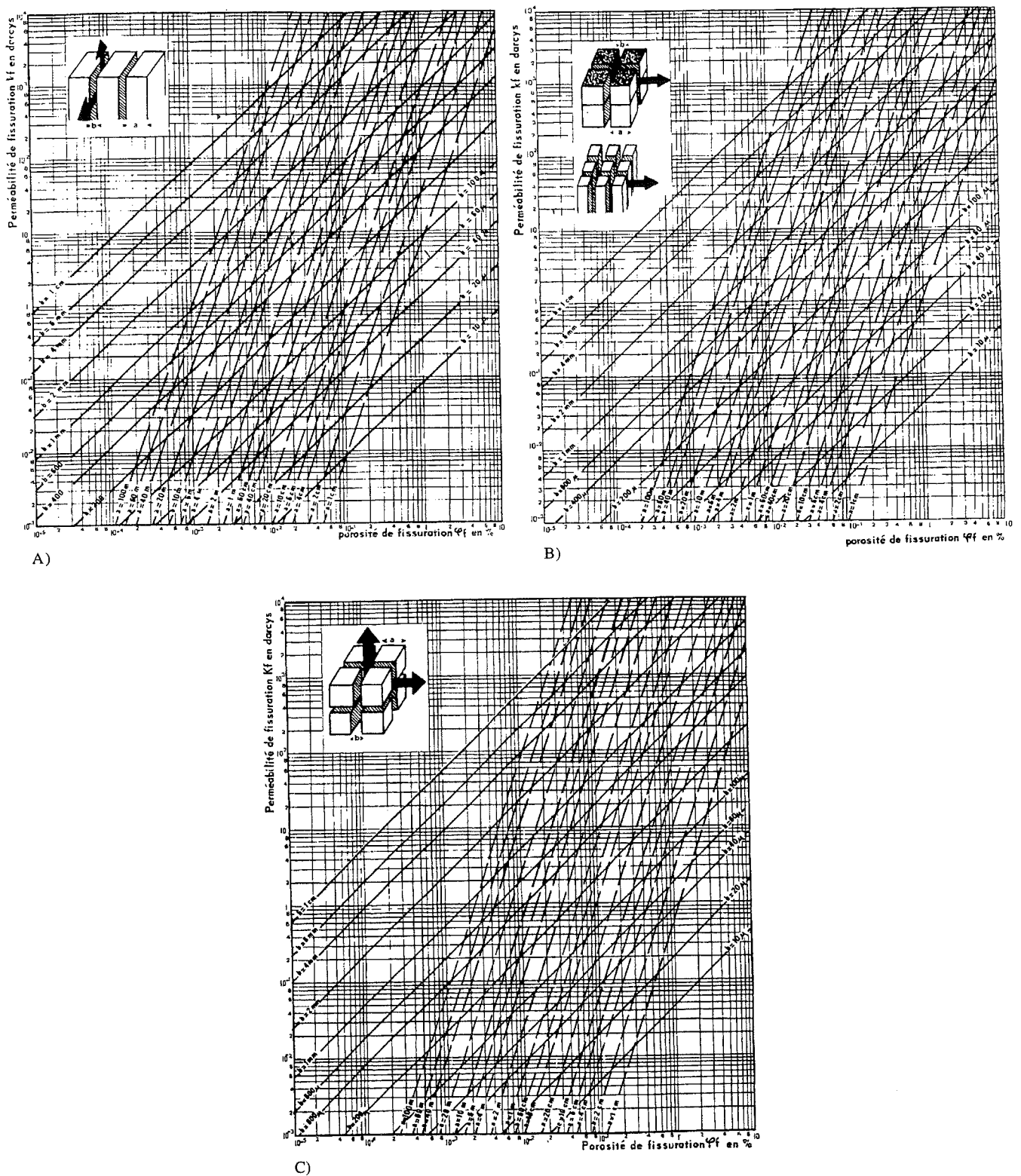


FIG. 6.— Relation entre perméabilité de fissuration K_f (en ordonnée), porosité de fissuration Φ_f (en abscisse), dimension a du bloc élémentaire, et ouverture des fissures b . A) Cas des réservoirs fissurés du type « feuilles ». B) Cas des réservoirs fissurés du type « allumettes ». Ecoulement perpendiculaire à l'axe des allumettes ; C) Cas des réservoirs fissurés du type « blocs ». Sur les axes sont portées, en abscisses la porosité de fissuration en pourcentage, et en ordonnées la perméabilité. Une série de droites sert au choix du paramètre a qui représente l'épaisseur de la matrice (feuillet, allumette ou bloc). La seconde série de droites permet le choix du paramètre b d'ouverture des fissures. Les valeurs de perméabilité et de porosité sont données par l'intersection des deux droites correspondant aux valeurs de a et de b . D'après Reiss [1980].

La géostatistique a été proposée comme moyen pour tenter de reproduire la variabilité spatiale de la fracturation, à partir de données mono- ou bidimensionnelles, dans certaines conditions [Massoud, 1987 ; Billaux, 1990].

Ainsi, Billaux [1990] propose une méthode permettant de tenir compte à la fois de la régionalisation des fractures et des valeurs locales relevées. Un variogramme du champ à modéliser est élaboré. Un grand nombre de sphères, de diamètre égal à la portée du variogramme (ou distance limite au-delà de laquelle il n'y a plus de corrélation spatiale), est ensuite engendré dans l'espace. Les centres des sphères obéissent à une loi de Poisson. Il leur est affecté aléatoirement un poids de +1 ou -1. En tout point de l'espace, la valeur simulée est alors la somme des poids des sphères qui incluent ce point. Le nombre de sphères étant important, les valeurs simulées approchent une distribution gaussienne. Des corrections sont alors éventuellement apportées, si la valeur calculée diffère, au même point, de la valeur réelle connue par la mesure, ou encore lorsque la variable étudiée ne suit pas une distribution normale mais une autre distribution connue.

Une difficulté spécifique à l'étude de la fracturation est que cette dernière doit être quantifiée par plusieurs grandeurs (orientations, dimensions, espacements), et

non par une seule comme dans le cas d'une teneur de minéral. Ceci devient fortement problématique lorsque ces grandeurs sont dépendantes. Pour cette raison, Billaux [1990] n'inclut dans son analyse géostatistique que la longueur des fractures et leur densité.

En outre, la nécessaire validité statistique des mesures impose des supports de taille importante et un nombre de mesures suffisant.

2.2.4. L'approche stochastique

Alimentés par des observations de terrain et par des distributions géostatistiques de plusieurs paramètres de la fracturation (orientation, pendage, densité, dimensions, etc...), les modèles stochastiques permettent de générer des réseaux pseudo-aléatoires plus ou moins complexes reproduisant les caractéristiques statistiques spécifiées.

D'abord développés en deux dimensions [Long, 1983 ; Robinson, 1984] (fig. 7), ces outils ont rapidement évolué pour intégrer la troisième dimension [Long *et al.*, 1985 ; Cacas, 1989]. Différents auteurs ont alors employé des fractures de formes diverses. Certains utilisent des fractures en forme de disques orthogonaux [Long *et al.*, 1985] (fig. 8) ou d'orientations quelconques [Billaux, 1990] (fig. 9).

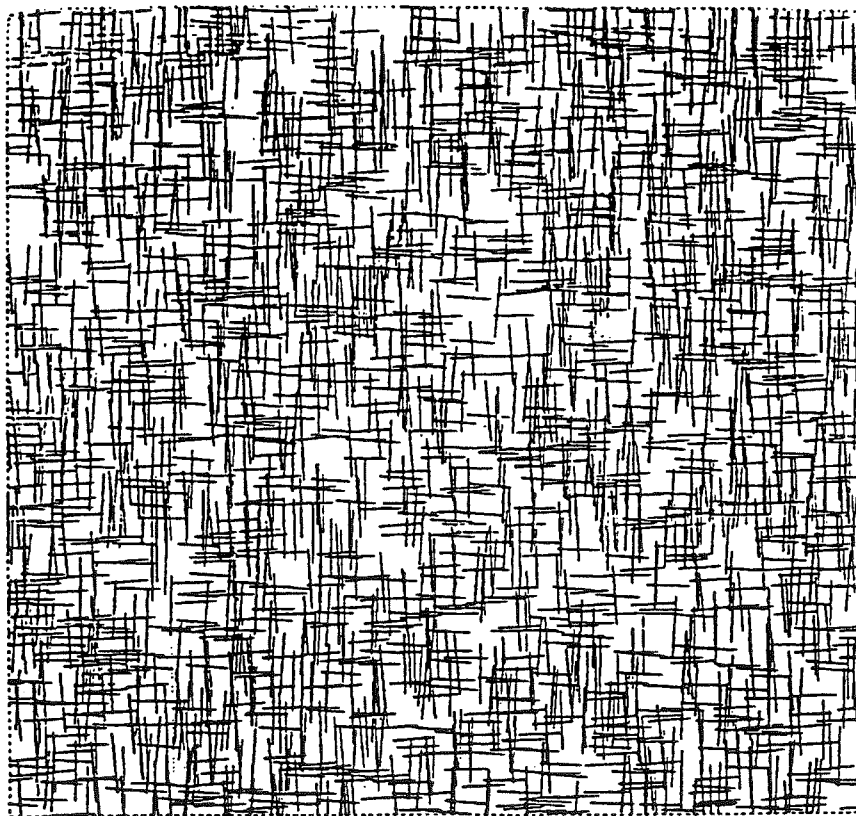


FIG. 7.- Réseau de fractures simulé en deux dimensions [Robinson, 1984].

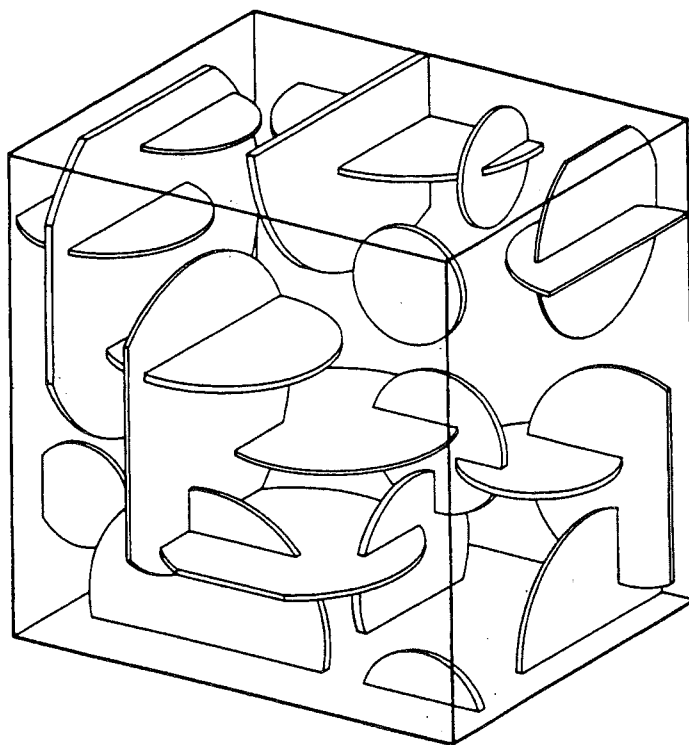


FIG. 8.- Réseau de fractures simulé en trois dimensions [Long *et al.*, 1985]. Les fractures sont représentées sous forme de disques orthogonaux.



Fig. 9.- Génération stochastique d'un réseau tridimensionnel de fractures représentées par des disques (d'après Billaux [1990]).

Dans ces modèles, les fractures se terminent brutalement au sein de la roche, et non pas sur d'autres fractures. C'est également le cas des fractures rectangulaires et polygonales de Gale *et al.* [1991] (fig. 10).

Dershowitz [1984], reprenant le modèle de Veneziano [1978] génère des plans infinis suivant une distribution poissonnienne, dont l'intersection forme des polygones qui représentent les fractures.

Ces modèles ont d'abord été utilisés pour juger de la validité des paramètres choisis, plutôt que pour simuler des écoulements après calage sur des valeurs mesurées. Ainsi, on a notamment étudié l'influence de la forme de distribution des fractures, ou les corrélations éventuelles entre paramètres, ou encore le degré de connectivité en fonction du nombre d'intersections par fracture [Robinson, 1984 ; Rouleau *et al.*, 1985].

La principale critique que l'on peut adresser à ce genre de modèle est l'aspect peu réaliste des sections réalisées dans le réseau généré, aspect dû à une géométrie trop simplificatrice : fractures infinies, parallèles ou réseau entièrement connecté ne rendent pas compte du milieu réel. Tout au plus peuvent-ils rendre compte de

cas très simples. Bien qu'utilisant les données de la géostatistique, ils se révèlent encore insuffisamment descriptifs pour permettre une confrontation avec les mesures du milieu réel. Les propriétés élémentaires du réseau ou de la fracture qu'ils mettent en jeu (orientation, espacement, densité, distribution, taille des fractures dans certains cas) limitent leur pouvoir de résolution.

Un autre écueil de l'approche purement stochastique est le fait qu'elle ne reproduit pas *a priori* le groupement de fractures en amas (« clustering ») observable sur le terrain. Il est apparu alors intéressant de chercher d'autres voies susceptibles de traduire un tel phénomène. Ainsi par exemple, Chiles [1988] a utilisé l'approche fractale pour limiter l'uniformité de sa distribution stochastique de fractures. Belfield [1994] pour sa part a simulé un comportement multifractal pour étudier l'ouverture des fractures, et parvient ainsi à reproduire le groupement en amas.

La géométrie fractale a donc apporté une contribution importante comme outil de caractérisation et de description quantitative des objets structuraux. C'est à ce titre uniquement que nous envisageons ci-dessous une présentation de la théorie des fractals.

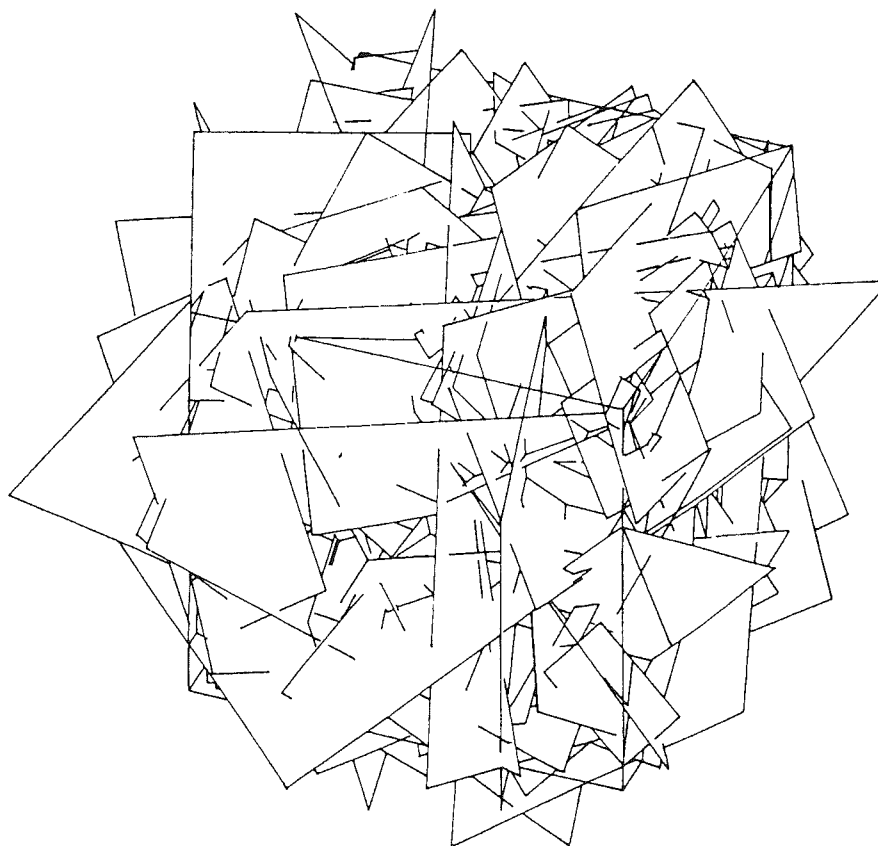


Fig. 10.— Réseau tridimensionnel stochastique de fractures représentées par des rectangles (d'après Gale *et al.* [1991]).

3.- CARACTÉRISATION GÉOMÉTRIQUE FRACTALE DES MILIEUX FRACTURÉS

La théorie des fractals, dont l'application dans le domaine scientifique a d'abord été jugée très universelle est le fondement de modèles de plus en plus nombreux dans tous les domaines des sciences. Citons rapidement, entre autres en sciences de la terre :

- la longueur des côtes maritimes [Mandelbrot, 1967, 1983, 1989 ; Grunberger, 1991]
- la relation de Korcak sur le nombre d'îles dont la surface est supérieure à une valeur donnée [Mandelbrot, 1975]
- la relation de Gutenberg-Richter sur la relation fréquence/magnitude des séismes [Aki, 1981]
- la loi de Rosin entre le nombre et la taille des fragments de roches [Turcotte, 1986]
- l'étude de Velde et *al.* [1990] qui montre, sur un batholite de granite l'auto-similarité du phénomène fractal sur 5 ordres de grandeur.
- les travaux de Ouillon [1995], qui montrent l'intérêt d'un outil de résolution plus poussée que la simple analyse fractale pour approfondir la notion d'invariance d'échelle de la fracturation.

Il est utile de justifier ici la place de cette théorie dans une modélisation de la fracturation, avant d'exposer quelques travaux relatifs à ce type de modélisation.

3.1. Bref historique

Jusqu'aux travaux de Mandelbrot [1967], les ensembles ou fonctions qui présentaient un caractère « pathologiquement » irrégulier (poussière de Cantor, courbe de Peano, vols de Levy, etc.) étaient considérés comme des curiosités ésotériques et inutilisables, auxquelles ne s'appliquait aucun traitement classique.

Mandelbrot [1975] utilisa en précurseur ces ensembles dans l'étude des phénomènes naturels, et définit la notion de *fractal*, du latin *fractus*, irrégulier ou brisé. Il établit certaines de leurs propriétés :

- Ces systèmes ont une *structure fine*, c'est-à-dire montrent, à partir d'une échelle donnée, des détails à des échelles d'observation plus petites. Depuis la vue d'avion jusqu'à la lame mince, le réseau de fractures montre des éléments structuraux de plus en plus fins, qui précisent sa structure.
- Ils ne montrent pas de mesure caractéristique. En effet, tout agrandissement révèle la même structure à différentes échelles. Cette *auto-similarité* observée correspond souvent à une homothétie interne à l'objet (*auto-affinité*). Le réseau de fractures présente des structures comparables, qu'il soit vu d'avion, à l'affleurement ou en lame mince : c'est l'invariance d'échelle reconnue en géologie de la fracturation.

- A l'échelle globale comme locale, ils sont trop irréguliers pour être décrits par les mathématiques traditionnelles. Par exemple, de nombreux fractals sont non dérivables en tout point, ce qui rend impossible une traduction analytique. La description d'un réseau de fractures de façon mathématiquement simple est tout aussi impossible pour la même raison.

- Leur description par la géométrie euclidienne est également mise en échec, du fait qu'aucune dimension entière au sens classique ne peut souvent leur être attribuée.

- Bien que leur mesure diverge, ces objets restent confinés dans une partie finie de l'espace.

Cette notion peut être abordée sous son aspect mathématique traditionnel pour décrire les objets de la géométrie euclidienne. Ainsi, une droite, un plan et un volume ont des dimensions respectives de 1, 2 et 3. On entend ici la *dimension topologique*, dont les valeurs sont entières.

En observant le monde réel, on peut, par analogie avec les entités géométriques, attribuer aux objets une *dimension perçue*. Ainsi, une pelote de fil [Mandelbrot, 1983, 1989] apparaît, en se rapprochant progressivement comme un point vue de l'infini (dimension effective nulle), comme un volume vu de plus près (dimension effective égale à 3), puis comme un long fil (dimension 1), puis comme un ensemble de cylindres (dimension 3), etc... La notion d'échelle d'observation apparaît avec celle de dimension perçue. Elle traduit le *caractère métrique*, et *lié à la mesure* de la dimension. On conçoit bien alors la difficulté pour définir une dimension pour les objets du monde réel, comme le sont les réseaux de fractures.

3.2. Approche empirique de la dimension fractale

A la suite de Richardson [1961], Mandelbrot [1967] propose, dans un travail sur la mesure des côtes maritimes une définition de la dimension non entière, par ailleurs déjà connue alors sur le plan théorique en mathématiques pures.

La question que Mandelbrot se pose est la détermination de la mesure d'une côte maritime entre deux points $P1$ et $P2$ arbitrairement choisis. Cette côte est assimilée à une courbe plane, invariante géométriquement. Il effectue pour ce faire plusieurs mesures successives, en utilisant pour chacune une échelle différente, à l'aide de bâtons de tailles variables par exemple.

Soit L la distance linéaire entre $P1$ et $P2$. Une première mesure peut être obtenue à l'aide d'un bâton de longueur L . Elle vaut $L_0 = L$. En mesurant de nouveau la portion de côte avec un bâton de longueur $L/2$, on

obtient une mesure L_1 , telle que $L_1 > L_0$. On peut réitérer le processus en divisant chaque bâton en 2 (fig.11). D'une manière générale, si $i > j$ alors $L_i > L_j$.

En poursuivant les estimations à l'aide de bâtons de plus en plus courts, la mesure ainsi effectuée tend vers l'infini :

$$\lim_{i \rightarrow \infty} L_i = +\infty \quad (\text{I.6})$$

Les données recueillies par Mandelbrot montrent que le nombre de bâtons $n(l)$ de longueur l nécessaires pour la mesure obéit à la règle suivante :

$$n(l) = K.l^{-d} \quad (\text{I.7})$$

où K est une constante réelle et d est un réel, la *dimension fractale* de l'objet mesuré. On en déduit la valeur $L(l)$ de la mesure de portion de côte entre $P1$ et $P2$, effectuée avec un bâton de longueur l :

$$L(l) = l.n(l) = K.l^{1-d} \quad (\text{I.8})$$

Du point de vue du formalisme mathématique, cette dimension est aussi appelée dimension de Hausdorff [Dubois, 1995]. Nous verrons ci-dessous que d'autres techniques permettent d'évaluer une dimension également qualifiée de fractale, mais dont la valeur diffère de la dimension de Hausdorff.

La dimension fractale d peut être approchée par la pente p de la droite représentative de $L(l)$ dans un graphe bilogarithmique : $p = 1 - d$ (fig. 12).

Dans le cas d'un cercle, comme d'ailleurs pour toute courbe régulière dépourvue de structure fine, la mesure converge aux petites échelles, indiquant une valeur de la dimension égale à 1. Pour la mesure des côtes, en revanche, le phénomène persiste aux petites échelles, ceci étant dû à l'apparition de détails de plus en plus fins que l'on doit prendre en compte. La valeur de la dimension fractale ainsi évaluée est proche de 1,2 (1,26 pour la côte bretonne par exemple).

Notons qu'en pratique, l'expression $\lim_{i \rightarrow \infty} L_i = \lim_{l \rightarrow 0} L(l)$ a une valeur finie, la mesure de la portion de côte étant sans doute concrètement limitée à la taille minimale des particules considérées (rochers, galets, grains de sable, molécules, atomes, ...). Ceci montre à l'évidence que le caractère fractal des objets naturels doit être assorti d'un domaine de validité.

On notera à ce stade que le caractère fractal de l'objet est révélé par une distribution de mesures de longueur sous la forme d'une *loi puissance*. Il s'agit là d'une propriété très générale qui a permis de révéler le caractère fractal de toute une gamme d'objets, dont les réseaux de fractures. Il n'y a cependant pas identité entre la dimension fractale (de Hausdorff ou autre) et l'exposant de la loi puissance obtenue dans l'échantillon.

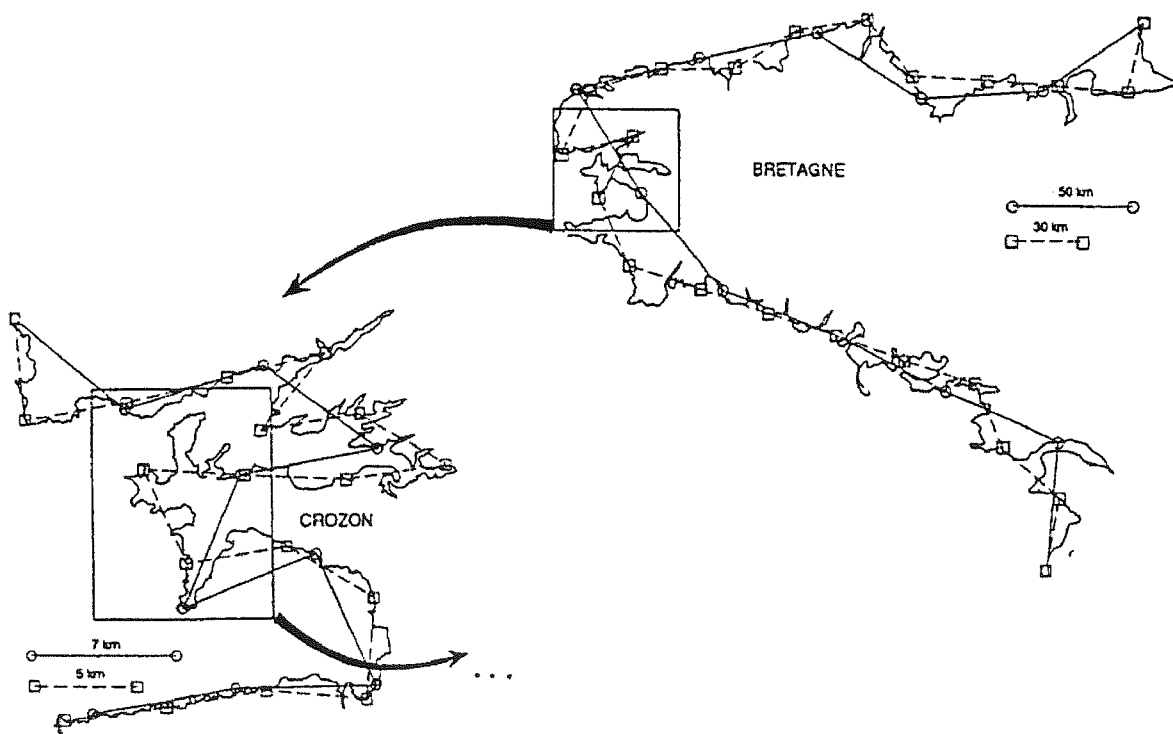


FIG. 11.- Mesure d'une portion de côte de Bretagne, par la méthode de Richardson. On emploie pour la mesure des segments de longueur décroissante. D'après Richardson [(1961)].

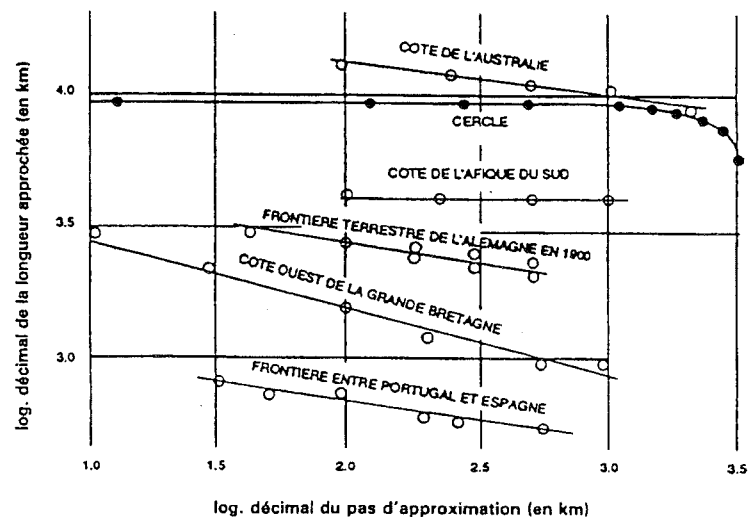


FIG.12.- Détermination de la dimension fractale de portions de côtes rocheuses et frontières, selon Richardson [1939]. La pente de la droite vaut $(1 - D)$ en coordonnées bilogarithmiques. D'après Mandelbrot [1975] et Dubois [1995].

3.3. Approche pratique de la dimension fractale

L'accès pratique à la valeur de la dimension de Hausdorff n'est pas toujours possible. Aussi, dans le cas général, on utilise plusieurs méthodes de mesure qui donnent *plusieurs* dimensions fractales spécifiques, plus ou moins proches de la dimension de Hausdorff. Parmi la grande variété de méthodes de mesure concrète d'une dimension fractale, nous exposerons les plus utilisées sur les champs de fractures, et quelques résultats correspondants.

3.3.1. Méthode du recouvrement minimal

Cette méthode découle directement de la définition mathématique de la dimension de Hausdorff (voir Dubois [1995]). En pratique, un ensemble fractal F formé de N_i objets de dimension r_i aura la propriété suivante [Mandelbrot, 1975 ; Huang et Turcotte, 1989]:

$$N_i = C \cdot r_i^{-D} \quad (\text{I.9})$$

où :

D est la dimension de F
 C est une constante, nommée *mesure de dimension* D de F .

Pour une distribution continue, si $N(r)$ est le nombre d'objets de F dont la dimension est supérieure à r :

$$N(r) = C \cdot r^{-D} \quad (\text{I.10})$$

Pratiquement, on cherche à couvrir l'ensemble étudié par un nombre minimal d'éléments disjoints deux à deux. Dans les cas simples, il est possible d'exploiter cette relation pour obtenir la dimension de Hausdorff :

$$\log N(r) = \log C - D \cdot \log r \quad (\text{I.11})$$

La dimension de Hausdorff D_H de F est alors définie par :

$$D_H = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\log N(r)}{-\log r} \quad (\text{I.12})$$

([Bergé *et al.*, 1984 ; Dubois, 1995] notamment).

Ceci permet, dans le cas où $N(r)$ varie comme r^{-D} pour r petit, de déterminer la dimension de Hausdorff D_H d'un ensemble fractal, en établissant en coordonnées bilogarithmiques le graphe de la fonction $\log(N(r)) = f(\log r)$. D_H est alors la pente de la droite obtenue (fig. 13).

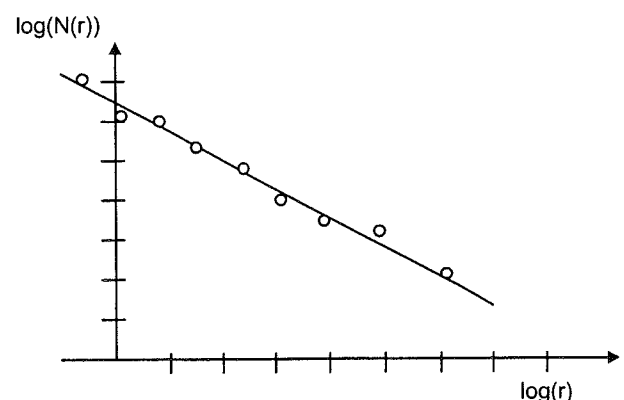


FIG.13.- Calcul empirique de la dimension de Hausdorff sur un graphe bilogarithmique. $N(r)$ est le nombre d'objets de taille supérieure à r . La dimension de Hausdorff D_H est la pente de la droite obtenue (D'après Dubois [1995]).

Okubo et Aki [Okubo *et al.*, 1987] ont mis en œuvre cette méthode sur le système de failles quaternaires de San Andreas, en recouvrant le réseau d'un nombre minimal de cercles (fig. 14). Les auteurs portent ensuite en coordonnées bilogarithmiques le nombre $N(r)$ de cercles de rayon r en fonction de r . La dimension fractale est alors obtenue par la pente de la droite. Pour une bande de 30 km de large centrée sur la faille principale, la dimension fractale obtenue est 1,31 sur l'ensemble de la zone. Cette valeur supérieure à 1 reflète le tracé bifurqué du réseau de failles. Elle n'est cependant pas homogène : en découpant la zone en six tronçons, les auteurs obtiennent pour ces tronçons des valeurs de dimension différentes (de 1,12 à 1,43). Par ailleurs, le graphe bilogarithmique montre une rupture de pente pour une certaine valeur du rayon, ce qui prouve la nature non auto-similaire de la trace du système de failles [Dubois, 1995].

La mise en œuvre automatique pratique de cette méthode est quasiment impossible d'un point de vue

algorithmique dans la plupart des cas. On a donc le plus souvent recours à la méthode du comptage de boîtes qui est largement plus utilisée.

3.3.2. Méthode du comptage de boîtes

Il s'agit d'une méthode qui procède, comme la précédente par recouvrement de l'ensemble à étudier. On superpose à l'espace euclidien \mathcal{R}^n un quadrillage à n dimensions de pas ε donné (fig. 15). On compte alors les cases de l'espace qui contiennent une partie de l'objet. On renouvelle l'opération pour des valeurs décroissantes de ε , en notant à chaque fois le nombre de cases occupées $N(\varepsilon)$. On obtient ainsi, dans un diagramme bilogarithmique, la dimension D par la pente de la fonction : $\log(N(\varepsilon)) = f(\varepsilon)$ (I.13)

La dimension D ainsi obtenue est calculée par :

$$D = \frac{\log N(\varepsilon)}{-\log \varepsilon} \quad (\text{I.14})$$

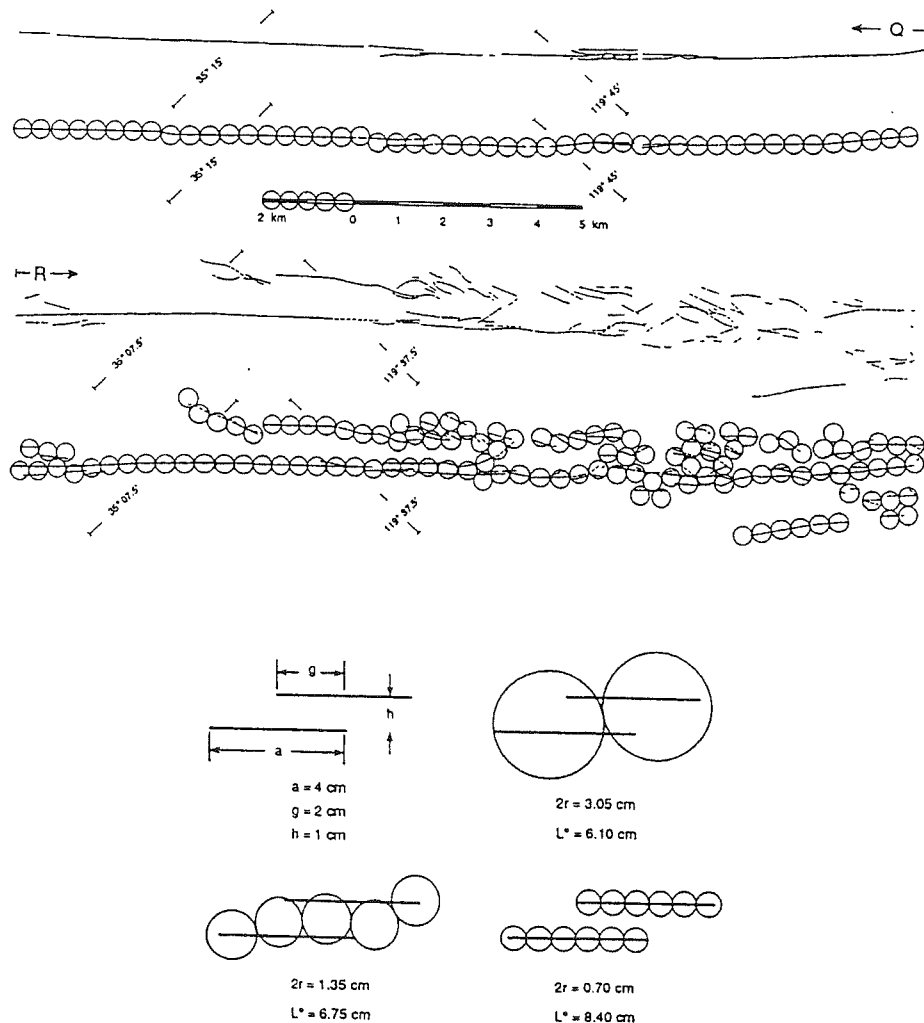


FIG. 14.— Illustration de la méthode de recouvrement utilisée par Okubo et Aki [1987] sur le système de failles de San Andreas. Dans l'exemple donné dans la partie inférieure du schéma, on essaie de couvrir 2 fractures à l'aide d'un nombre N_i de disques disjoints de diamètres croissants D_i . Dans la partie supérieure du schéma, un exemple de recouvrement du réseau.

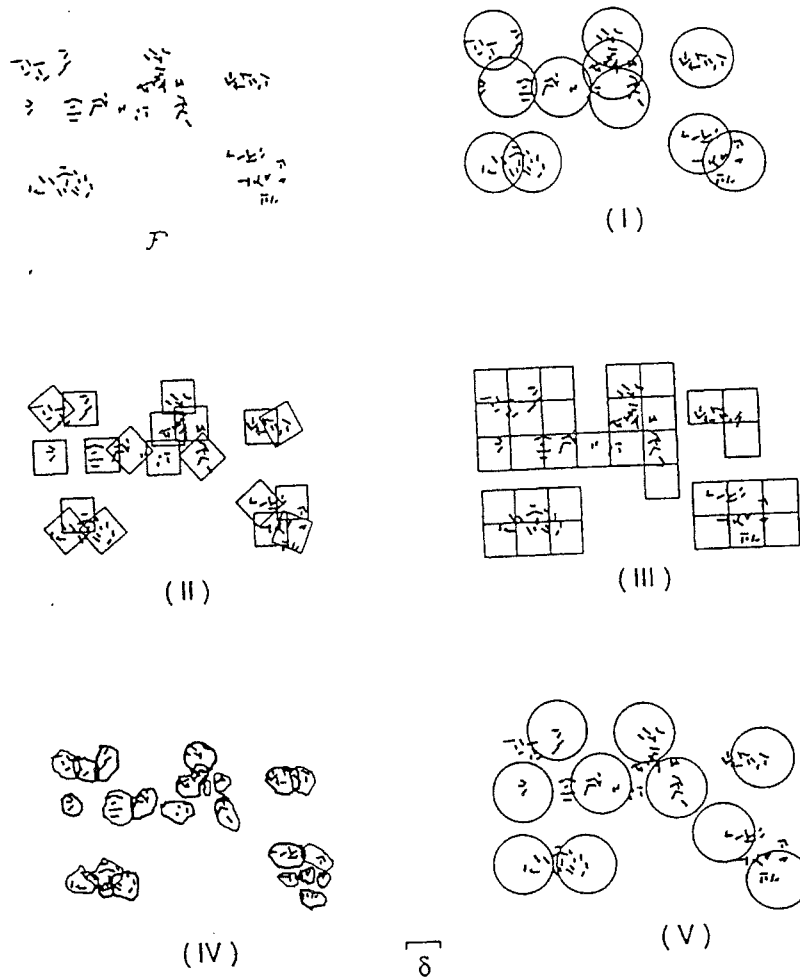


FIG. 15.- Illustration de la méthode de comptage de boîtes pour le calcul de la dimension fractale. L'ensemble F est recouvert par des boîtes de formes diverses. D'après Falconer [1990] et Dubois [1995].

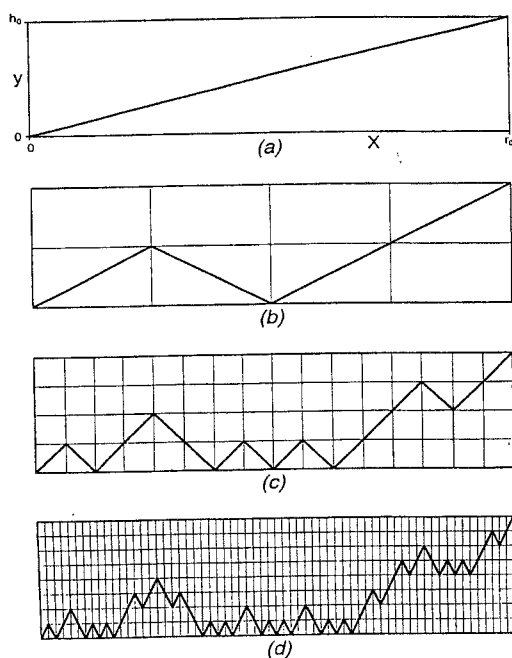


FIG. 16.- Construction d'un fractal auto-affine élémentaire. En (c) : chaque segment de (b) est remplacé par le motif (b) qui sert de générateur. [Turcotte, 1997]. Pour un fractal auto-similaire dans le plan des coordonnées x, y , la similarité statistique est la même dans toutes les directions du plan, ce que l'on peut imaginer en disant que, si f est la fonction qui permet de passer d'un stade du fractal au suivant, $f(rx, ry)$ est statistiquement similaire à $f(x, y)$, r étant le facteur d'échelle. A contrario, un fractal auto-affine montre une anisotropie dans le plan, que nous exprimerons en disant que c'est cette fois $f(rx, r^{D_H} y)$ qui est statistiquement similaire à $f(x, y)$. D_H représente la dimension de Hausdorff introduite plus haut. Concrètement, un fractal auto-affine de ce type faisant appel à des facteurs d'échelles différents suivant les axes de coordonnées, la définition formelle nous permet de dire que $f(\frac{x}{4}, \frac{y}{2})$ est statistiquement similaire à $f(x, y)$, avec $r = \frac{1}{4}$, $r^{D_H} = \frac{1}{2}$ et $(\frac{1}{4})^{D_H} = \frac{1}{2}$, d'où la dimension de Hausdorff pour ce fractal : $D_H = 0,5$.

Elle est appelée *dimension de capacité* [Mandelbrot, 1983 ; Falconer, 1990] et elle est inférieure ou égale à la dimension de Hausdorff. Cette méthode comporte un handicap important : elle n'est pas transposable telle quelle à l'étude d'une certaine catégorie de fractals, nommés *auto-affines* [Voss, 1988] (fig. 16).

Si nous voulons utiliser la méthode de comptage de boîtes pour obtenir la dimension de capacité d'un fractal auto-affine, il faut *a priori* connaître la dimension de Hausdorff. Il convient d'employer des rectangles pour couvrir l'objet (fig. 17). En remarquant qu'il faut $N=8$ rectangles, nous obtenons, par :

$$D = \frac{\ln 8}{-\ln(1/4)} = 1,5$$

La dimension de capacité obtenue, $D = 1,5$ est bien intermédiaire entre la dimension topologique de la droite et celle du plan. Par ailleurs, on remarque qu'elle satisfait la relation :

$$D + D_H = 2 \quad (\text{I.15})$$

Nous voyons, avec cet exemple, que l'utilisation d'une méthode de comptage de boîtes est théoriquement possible pour les fractals auto-affines [Dubois, 1995]. Cependant, ceci demande que l'on connaisse *a priori* la

dimension de Hausdorff, ce qui n'est évidemment jamais le cas lors de l'analyse de fractals.

Dans le cas de réseaux de fractures, nous ne savons pas *a priori* si les fractals rencontrés sont auto-affines. Notons néanmoins que l'évaluation de la dimension de Hausdorff ne présente qu'un intérêt généralement limité. Il est par contre beaucoup plus intéressant de révéler le caractère fractal ou non de telle ou telle propriété du réseau de fractures, quelle que soit la dimension qui permet de caractériser cette propriété.

Par ailleurs, il est intuitif que cette méthode présente des effets de bord gênants : considérons un objet d'étude plan limité par une courbe dont certaines portions montrent des concavités (fig. 18). Plus le pas ε diminue, plus la représentation des concavités est accentuée. Une telle méthode donnera donc dans ce cas une dimension fractale différente de 2. La solution idéale à ce problème serait de faire porter l'étude sur un échantillon carré de l'objet, entièrement couvert par le dispositif de comptage [Ouillon, 1995]. On peut, plus facilement, définir, au sein de l'objet, une grille de taille maximale pour le comptage, comme le montre, par exemple la figure 19 pour un champ de fractures [Walsh et Watterson, 1993].

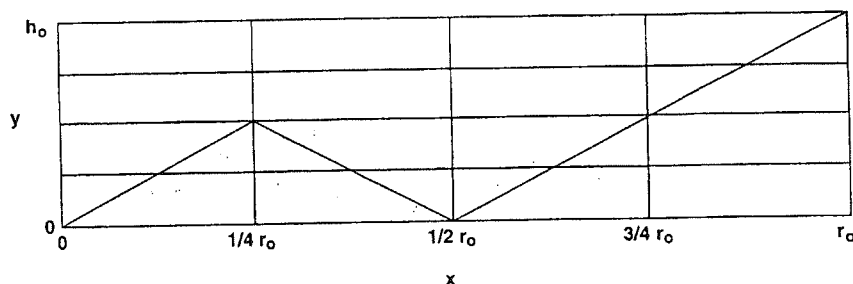


FIG. 17.— Application de la méthode de comptage de boîtes sur un fractal auto-affine. Pour déterminer sa dimension, on utilise des rectangles de largeur $r_i = r_0/4$ et de hauteur $h_i = h_0/4$. L'objet est recouvrable par les $N_i = 8$ rectangles grisés. Puisque $N_0 = 1$ pour la boîte de hauteur h_0 et de largeur r_0 , on obtient $D = 3/2$. [Turcotte, 1997]

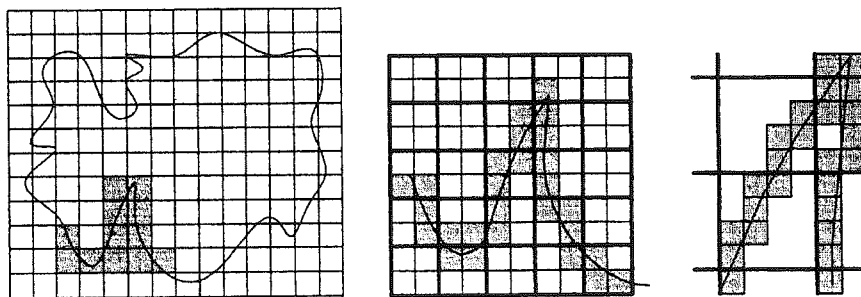


FIG. 18.— Effets de bord dans la méthode de comptage de boîtes. Plus le pas diminue, et plus les concavités « se vident ».

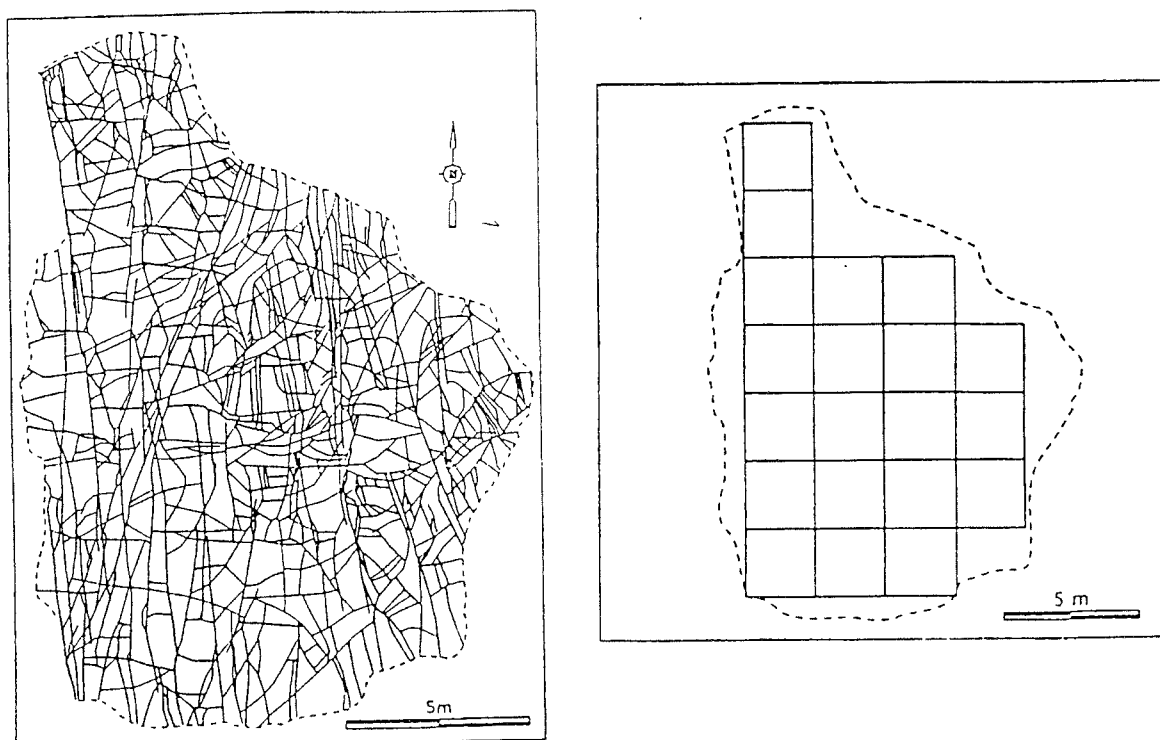


FIG. 19.- Elimination des effets de bord dans la méthode comptage de boîtes par restriction du domaine couvert. (D'après Walsh et Watterson [1993] et Ouillon [1995]).

Walsh et Watterson [1993] montrent que l'appréciation de la dimension fractale est améliorée en utilisant un nombre initial de boîtes qui couvre mieux le champ de fractures qu'une boîte unique (fig. 20). Cette solution aux effets de bords est néanmoins peu efficace pour des formes d'objets complexes.

A titre d'exemple parmi les multiples travaux faisant appel à la méthode de comptage de boîtes, citons le travail de Vignes-Alder *et al.* [1991] sur la fracturation de l'Afrique. Deux régions sont considérées. L'une est la zone centrafricaine. Du mètre au kilomètre, elle montre une dimension fractale homogène et égale à 2. L'autre zone, étudiée sur des échelles de 10 à 100 km, est la zone d'Assaba-Tagant. Au sein de celle-ci, le massif du Tagant est homogène au regard de la dimension fractale, tandis que le plateau d'Assaba donne des valeurs comprises entre 1,36 et 1,6. La différence de dimension entre ces deux grandes zones est attribuée à l'histoire tectonique, relativement simple dans le cas de la zone Assaba-Tagant (deux phases de compression), plus complexe en zone centrafricaine. D'après les auteurs, cette complexité induirait une isotropie en termes d'orientations des structures et serait responsable de la valeur stable de la dimension fractale dans ce secteur.

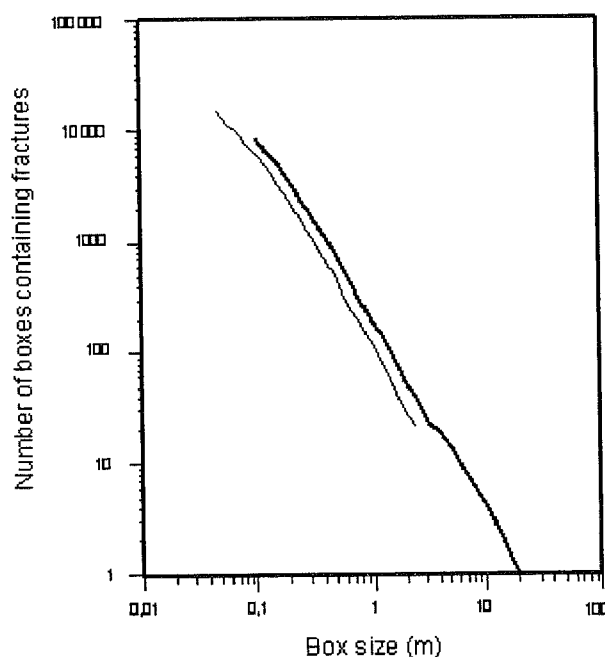
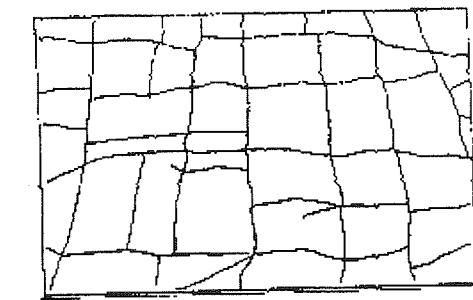


FIG. 20.- Mise en évidence d'une loi fractale avec la méthode de comptage de boîtes, pour le champ de fractures de la figure 19 [Walsh et Watterson, 1993]. En trait épais : les auteurs ont utilisé comme boîte initiale le plus grand carré inclus dans la surface du champ de fractures (contour en pointillé de la figure 19). La dimension obtenue est $D=1,77$. En trait fin : l'état initial du comptage est fait sur les 20 boîtes couvrant une plus grande surface du champ de fractures (cf fig. 19). La dimension fractale correspondante est $D=1,67$.

3.3.3. Méthode de la poussière de Cantor

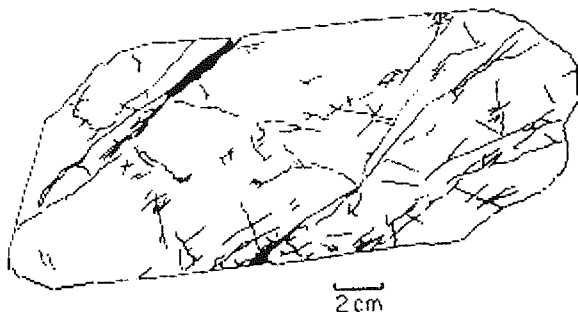
Cette méthode, exposée complètement par Velde *et al.* [1990] a été éprouvée à diverses échelles (fig. 21).



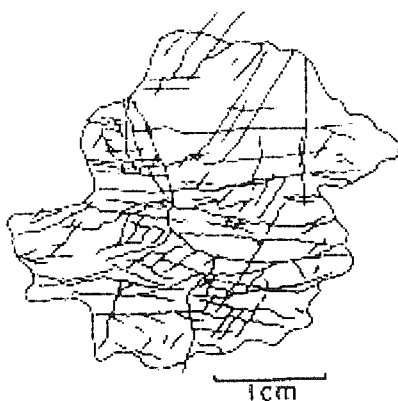
a)



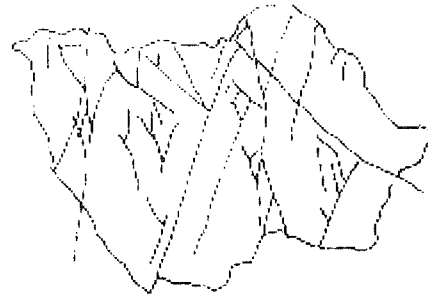
b)



c)



d)



e)

0.1mm

FIG. 21. – Réseaux de fractures utilisés par Velde *et al.* [1990] dans la méthode de la poussière de Cantor. a) Fentes de tension orthogonales dans des grès saoudiens [in Hancock, 1987]; b) Failles normales conjuguées dans des sédiments glaciaires pléistocènes d'Allemagne [in Mandl, 1988]; c) Granite sur une carotte, forage de Soultz-sous-Forêts (profondeur 1,7 km); d) et e) Champs de fractures sur des grains de feldspath (carotte de granite de Soultz-sous-Forêts).

Elle consiste à couper le champ de fractures par une droite orientée. L'ensemble des points d'intersection ainsi générés est examiné par une méthode comptage de boîtes. On recouvre l'intervalle étudié, de longueur L , par des segments de longueur l_i . Si la disposition des points d'intersection est fractale, on observe :

$$N_i = l_i^{-D} \quad (I.16)$$

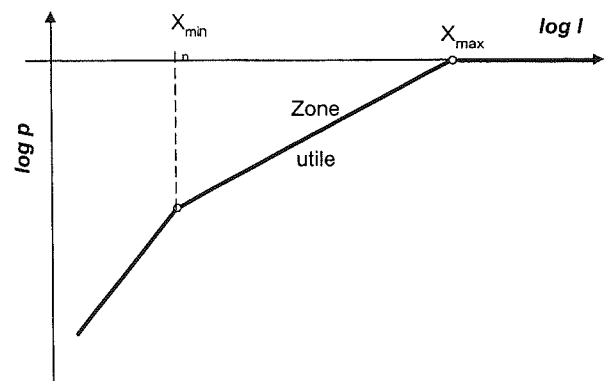


FIG. 22. – Détermination de la dimension par la méthode de la poussière de Cantor. p est la proportion des segments de mesure contenant au moins une intersection, l est la longueur d'un segment de mesure. X_{\min} est la longueur en-dessous de laquelle chaque segment contiendra au plus une intersection. X_{\max} est la longueur du segment au-dessus de laquelle tous les segments contiennent au moins une intersection. La zone utile montre une pente $1-D$ (d'après Velde [1991]).

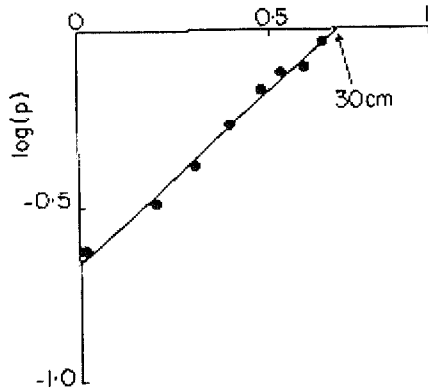


FIG. 23.- Exemple de détermination de la dimension fractale par la méthode de la poussière de Cantor [Velde *et al.*, 1990] sur les grès saudiens (cf fig. 21). La pente obtenue varie de 0,75 à 0,9 selon la direction. Les auteurs en déduisent que cette variation est faible, ce qui traduit le caractère fractal du réseau. La dimension fractale correspondante est $D \approx 0,1$. La valeur de X_{\max} (intervalle qui contient toujours une fracture est de 30 cm.

Si l'on considère la proportion p_i des segments qui contiennent au moins une intersection, on a :

$$N_i l_i = L \cdot p_i \text{ et } N_{i+1} l_{i+1} = L \cdot p_{i+1} \quad (\text{I.17})$$

d'où :

$$\frac{p_{i+1}}{p_i} = \frac{N_{i+1} l_{i+1}}{N_i l_i} = \left(\frac{l_{i+1}}{l_i} \right)^{1-D} \quad (\text{I.18})$$

En portant p en fonction de l dans un graphe bilogarithmique, on obtient une droite si la répartition est fractale, ou une courbe si elle est gaussienne ou stochastique. L'expérimentation montre [Velde *et al.*, 1990] qu'on obtient trois segments de droite, séparés par deux points critiques X_{\min} et X_{\max} (fig. 22 et fig. 23).

Entre ces deux points, l'équation (I.18) est valable, la pente de la droite est $1-D$. Pour des valeurs de l inférieures à X_{\min} , p_i est faible et le rapport p_{i+1}/p_i tend vers 1, la pente est 1 et la dimension est 0, soit celle du point. La répartition à cette échelle montre en quelque sorte les intersections groupées en amas. X_{\min} est la valeur du pas pour lequel chaque segment contient au plus une intersection. Par ailleurs, X_{\max} est la valeur pour laquelle tous les segments contiennent au moins une intersection. Au-delà de X_{\max} , p_i vaut 1, donc la pente est nulle et la dimension est 1, celle de la droite. La répartition des points d'intersection vue à cette échelle apparaît plus régulière. En pratique, la portion utile, pour l entre X_{\min} et X_{\max} montrera un caractère fractal « acceptable » lorsqu'elle couvre au moins un ordre de grandeur, c'est-à-dire lorsque X_{\max}/X_{\min} est supérieur ou égal à 10 [Davy *et al.*, 1990].

Un des handicaps majeurs de cette méthode est l'effet de taille finie important provoqué par le nombre très

réduit d'intersections, rendant risquée toute statistique. Pour contourner ce problème, Velde *et al.* [1990] utilisent comme support de lecture non pas une droite mais un ensemble de lignes parallèles. Les intersections sont alors lues d'une ligne à l'autre comme le sont les lignes d'un livre. Un paramètre important à considérer dans le résultat de ce type d'analyse est alors l'écartement des lignes de lecture, qui n'a pas fait l'objet d'études théoriques suffisantes [Dubois, 1995].

Velde *et al.* [1991] analysent de cette façon plusieurs batholites granitiques, dont un sur quatre ordres de grandeur et obtiennent des dimensions globales sur la zone d'étude comprises entre 0,28 et 0,50. Cependant, le classement des fractures dans cette étude, selon les régimes qui leur ont donné naissance (tension, décompression et cisaillement) fait apparaître de très fortes disparités (de 0,19 à 0,51 pour un granite d'Augères de dimension globale 0,40). D'autre part, on relève des incohérences puisque les propriétés des ensembles fractals voudraient que la dimension globale (0,40) soit la valeur maximale des dimensions des sous-ensembles (0,51), ce qui n'est pas le cas. Ces résultats semblent dus à la non prise en compte de la valeur des pendages dans l'établissement des classes de fractures [Ouillon, 1995].

3.4. Multifractals - Principaux résultats

La notion d'objet multifractal a été introduite par Mandelbrot [Mandelbrot, 1974]. La formalisation mathématique a suivi [Hentschel et Procaccia, 1983 ; Halsey *et al.*, 1986 ; Mandelbrot, 1989]. Nous renvoyons à ces publications pour une approche théorique. Nous donnons ici un résumé des résultats majeurs.

Un multifractal peut être considéré en fait comme un ensemble constitué lui-même d'objets fractals, de dimensions égales (*multifractals homogènes*) ou différentes (*multifractals hétérogènes*). L'analyse multifractale aura pour but de donner une représentation de l'hétérogénéité de l'ensemble, constitué d'une « superposition » de fractals simples.

L'analyse multifractale est une description statistique d'un jeu de données qui procure une information globale sur son auto-similarité [Halsey *et al.*, 1986]. Dans le cas concret d'un champ de fracture observé en 2D, la méthode consiste à couvrir la zone à étudier par un quadrillage régulier de maille l . On définit le poids p_i d'une boîte donnée i comme la proportion de longueur cumulée de fracture qui est contenue dans cette boîte. Nous avons vu qu'un objet fractal homogène (monofractal) est défini par la relation :

$$p_i \approx l^a \quad (\text{I.19})$$

où a est le même pour chaque boîte, et est la dimension fractale du réseau. L'analyse multifractale généralise ce concept, en le sens où pour certaines distributions, dites *multifractales*, a peut varier d'une boîte à l'autre, et devient donc une quantité locale.

La première étape pour effectuer une telle analyse consiste à calculer les moments d'ordre q de la distribution considérée :

$$M_q(l) = \sum_{i=1}^{n(l)} p_i^q \quad (\text{I.20})$$

où $n(l)$ est le nombre de boîtes contenant une partie du réseau. En variant l à q fixé on inspecte le comportement dans les échelles. En variant q à l fixé on regarde les propriétés des zones plus ou moins fracturées. Par exemple, lorsque q est grand, seules les boîtes où la densité de fracturation est importante vont participer significativement à la somme $M_q(l)$. Les paramètres statistiques qui en découleront concerneront les zones surfracturées. En revanche, si q devient très largement négatif, seules les boîtes faiblement fracturées seront décrites. Si q est nul, alors chaque boîte fracturée compte pour le même poids.

Si la distribution est auto-similaire, on a la relation suivante :

$$M_q(l) \approx l^{(q-1)D_q} \quad (\text{I.21})$$

où les D_q sont les dimensions généralisées d'ordre q . Par exemple, D_0 est appelée *dimension de capacité* (généralement considérée comme l'équivalent de la dimension fractale), alors que D_1 et D_2 sont appelées respectivement *dimension d'information* et *dimension de corrélation*. Bien évidemment, q peut prendre n'importe quelle valeur réelle. Par l'analyse multifractale, on peut également déterminer le nombre de boîtes $N(l)$ caractérisées par la même singularité locale a . Ainsi on a :

$$N(l) \approx l^{f(a)} \quad (\text{I.22})$$

ce qui définit $f(a)$ comme la dimension fractale de l'ensemble des singularités de force a . Une relation générale a été définie entre les divers paramètres précédemment introduits [Mandelbrot, 1989]:

$$\alpha(q) = \frac{d}{dq} [(q-1)D_q] \quad (\text{I.23})$$

$$f(\alpha(q)) = q\alpha(q) - (q-1)D_q$$

Cela signifie qu'un ensemble de boîtes caractérisées par le même exposant $a(q)$ contrôle le moment d'ordre q . Une distribution multifractale peut donc être vue comme un mélange d'ensembles fractals entremêlés de dimensions différentes. On peut montrer que les divers exposants sont tous des fonctions décroissantes de q . De même, il est immédiat de voir que la dérivée de $f(a)$ par rapport à a est égale à q . Ainsi, le spectre (fig. 24) est une courbe concave, présentant un maximum pour $q=0$. Ainsi, en représentant $\log(M_q(l))$ en fonction de $\log(l)$, on obtient $(q-1)D_q$ donc D_q . Il peut aussi être montré [Roux et Hansen, 1990] que la quantité

$$R_q(l) = \sum_{i=1}^{n(l)} p_i^q \log(p_i) \quad (\text{I.24})$$

est proportionnelle à $M_q(l)a(q)\log(l)$. Donc en représentant $R_q(l)/M_q(l)$ en fonction de $\log(l)$ on obtient $a(q)$. La relation (I.23) donne alors $f(a(q))$.

Cette méthode a été utilisée de manière standard dans un grand nombre d'études (dont on peut trouver une revue partielle dans Ouillon [1995]).

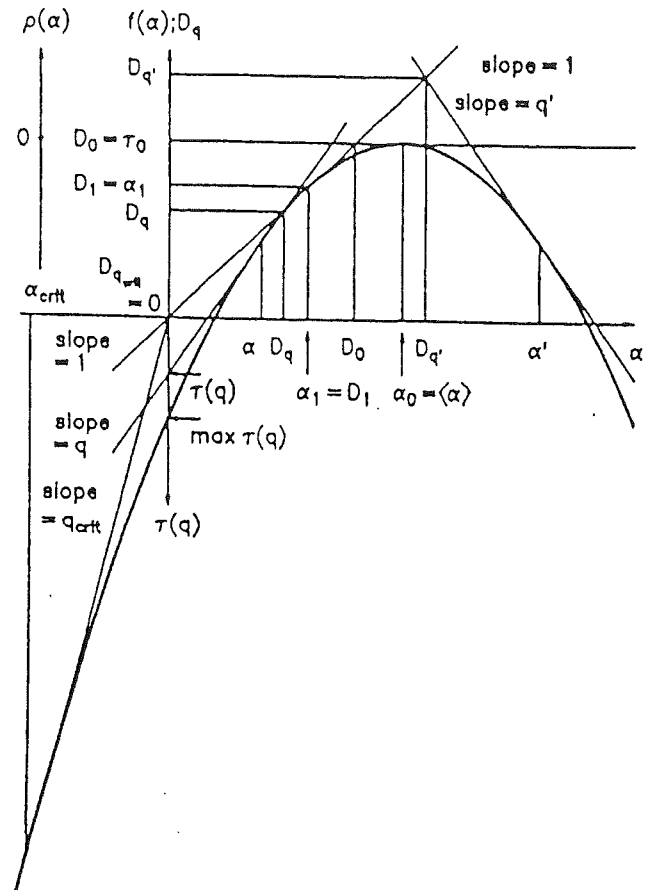


FIG. 24.- Spectre des singularités ou tracé $f(\alpha), \alpha$ et ses propriétés géométriques. (D'après Mandelbrot [1989]). Ce tracé $\alpha, f(\alpha)$, nommé *spectre des singularités* permet, par ses propriétés géométriques [Mandelbrot, 1989] de déduire l'ensemble des dimensions généralisées, et donc d'exprimer l'hétérogénéité d'un système fractal. Entre autres, le graphe présente un maximum pour α_0 tel que $f(\alpha_0) = D_0$; la tangente au graphe de pente q montre les propriétés suivantes : elle coupe la courbe au point $\alpha(q), f(\alpha(q))$; elle coupe l'axe des ordonnées pour $f(\alpha_0) = (1-d)D_q$; elle coupe la droite $f(\alpha) = \alpha$ pour la valeur $\alpha = D_q$. La force de singularité α fait apparaître une dérivée de D_q par rapport à q . A partir des valeurs de D_q obtenues expérimentalement, le tracé du spectre $(\alpha, f(\alpha))$ demanderait donc une interpolation risquée entre les points de mesure, susceptible de gommer des irrégularités significatives. Pour cette raison, Ouillon [1995] propose une méthode qui permet de déterminer α et D_q directement à partir des moments d'ordre q .

Cependant, la pratique montre que les exposants obtenus sont très sensibles aux effets de taille finie (nombre de fractures) et à la géométrie de la frontière de la zone d'échantillonnage.

Des travaux de laboratoire [Sornette *et al.*, 1993] ont reproduit une géométrie multifractale dans la croissance en 2D des fractures lors du phénomène de collision. Belfield [1994] observe une multifractalité sur les ouvertures de fractures naturelles. Ouillon [1995] étudie la plaque arabique, sur une gamme d'échelles allant du centimètre à la centaine de kilomètres, et met en évidence différentes lois puissance selon les échelles, ces échelles correspondant majoritairement à des discontinuités naturelles hiérarchisées, de l'épaisseur des bancs sédimentaires à la profondeur du Moho.

Le caractère multifractal observé dans la fracturation est la traduction d'une physique sous-jacente complexe. La multiplicité des lois d'échelle a suggéré de considérer la fracturation sous l'angle d'un phénomène critique (ou transition de phase du second ordre) [Sornette *et al.*, 1990 ; Ouillon, 1995]. Le concept particulier de *phénomène critique auto-organisé* (Self-Organized Criticality, ou SOC, [Bak *et al.*, 1988]) traduit, pour un système soumis à certaines conditions aux limites, l'évolution spontanée vers le point critique (problème de l'équilibre du tas de sable). Ce concept paraît prometteur pour une meilleure compréhension de la physique de la fracturation. Ainsi certains auteurs [Bak et Tang, 1989 ; Sornette et Sornette, 1989 ; Sornette, 1991] ont argumenté l'idée que la tectonique des plaques montrerait une telle propension à l'auto-organisation : la croûte terrestre, soumise à un flux d'énergie mécanique constant est le lieu de séismes qui expriment une nouvelle organisation, laquelle influe en retour sur la sismicité, etc... La croûte évolue ainsi vers un état critique caractérisé par des lois puissance.

La mise en évidence d'un fractal simple permet d'exprimer l'invariance d'échelle. En revanche, un multifractal ne montrera pas, en général, ces propriétés scalantes mais pourra exprimer la distribution des dimensions locales d'un objet. D'un point de vue strictement pratique, la détermination du spectre multifractal requiert en principe un nombre infini de valeurs, alors que l'analyse monofractale ne demande que deux paramètres (nombre N de boîtes de taille r par exemple), ce qui la rend plus accessible.

4.- GÉOMÉTRIE FRACTALE ET MODÉLISATION DE LA FRAGMENTATION

4.1. Fractals et modélisation de la fragmentation

La fragmentation peut être envisagée comme le processus génétique de la fracturation à toutes les

échelles, de celle de la croûte à celle de la roche. Malgré l'intérêt économique d'une compréhension du phénomène, une étude théorique globale sur le sujet n'existe toujours pas. Il faut attribuer cela à la complexité du phénomène de fragmentation, dont la dynamique implique deux grands mécanismes largement méconnus : l'initiation ou l'activation de la fracture sur des défauts ou points de faiblesse du matériau rocheux, puis, sous réserve d'une alimentation énergétique suffisante, la propagation de cette fracture dans le milieu, où la fracture interagit de façon complexe avec d'autres discontinuités. Le nombre des fractures, la taille et le nombre des fragments produits sont alors déterminés par le régime de contrainte et les propriétés du matériau [Grady et Kipp, 1987]. Après une brève revue des résultats expérimentaux, nous présenterons ici quelques modèles de fragmentation utilisant l'approche fractale, dont l'intérêt est de tout premier ordre pour la conception de notre modèle génétique de la fracturation.

4.2. Résultats expérimentaux et lois de distribution

En brisant des matériaux de diverses natures, un certain nombre d'auteurs ont tenté de corréler les données de masse des fragments par plusieurs types de distributions. Le tableau de la figure 25 donne un aperçu des résultats obtenus [Turcotte, 1997].

Les données obtenues expérimentalement peuvent être ajustées, selon les cas, sur la loi log-normale, la loi de puissance et celle de Pareto, ou encore sur la distribution de Weibull ou de Rosin-Rammler.

Concernant la *loi de puissance*, $N(m)$ étant le nombre de fragments de masse supérieure à m , les auteurs trouvent la relation :

$$N(m) = c.m^{-b},$$

où c est une constante. Comme $m \sim r^3$, on a $N(m) = c.r^{-3b}$, c'est-à-dire :

$$N(r) \sim r^{-D}, \text{ avec } D = 3b \quad (\text{I.25})$$

La distribution en loi de puissance observée est ainsi équivalente à une distribution fractale.

La *loi de Pareto* est donnée, pour k et a réels, par la fonction de distribution f et sa fonction de répartition F :

$$f(x) = \frac{ak^a}{(k+x)^{a+1}}, \text{ et } F(x) = \left(\frac{k}{k+x} \right)^a, \text{ pour } x \geq 0$$

La forme classique prend $k=1$, soit :

$$f(x) = \frac{a}{(1+x)^{a+1}}, \text{ et } F(x) = \frac{1}{(1+x)^a}, \text{ pour } x \geq 0 \quad (\text{I.26})$$

On note que pour $x \gg 1$, (I.26) devient :

$$F(x) = x^{-a}, \quad (\text{I.27})$$

relation qui rappelle la définition statistique de la

distribution fractale (eq. I.9). Ainsi, le paramètre a de la loi de Pareto est l'équivalent de la dimension fractale. La loi de Pareto montre effectivement une décroissance beaucoup plus lente que les lois normale ou log-normale, et se rapproche en cela de la distribution fractale (fig. 26).

Cependant, une différence fondamentale entre ces deux distributions apparaît dans le comportement lorsque x tend vers 0 : la loi de Pareto converge, alors que la distribution fractale montre la divergence requise par l'invariance d'échelle.

Ce modèle de loi n'est donc pas à même de rendre

compte du caractère scalant de la fragmentation lorsque celui-ci existe.

La distribution de Weibull [Gates, 1915 ; Rosin et Rammler, 1933 ; Bennett, 1936 ; Gilvarry, 1961 ; Kuznetsov et Faddeenkov, 1975 cités par Grady et Kipp, 1987] s'exprime sous la forme :

$$\frac{M(r)}{M_T} = 1 - \exp\left(-\left(\frac{r}{r_m}\right)^\alpha\right) \quad (I.28)$$

où $M(r)$ est la masse cumulée des fragments de rayon inférieur à r , M_T est la masse totale, r_m est le rayon moyen des fragments et α est un paramètre réel.

Objet	Référence	Dimension fractale
Quartz fragmenté artificiellement	Hartmann (1969)	1,89
Gneiss désagréé	Hartmann (1969)	2,13
Granite désagréé	Hartmann (1969)	2,22
Explosion chimique de 0,2 kT	Schoutens (1979)	2,42
Explosion nucléaire de 62 kT	Schoutens (1979)	2,50
Fragments de charbon	Benett (1936)	2,50
Astéroïdes	Klacka (1992)	2,50
Fragmentation de quartzite	Curran <i>et al.</i> (1977)	2,55
Fragmentation de basalte	Fujiwara <i>et al.</i> (1977)	2,56
Zone broyée de plan de faille	Sammis et Biegel (1989)	2,60
Argiles sableuses	Hartmann (1969)	2,61
Sols	Wu <i>et al.</i> (1993)	2,80
Graviers et sables de terrasses alluviales	Hartmann (1969)	2,82
Alluvions glaciaires	Hartmann (1969)	2,88
Pierre ponce et cendres volcaniques	Hartmann (1969)	3,54

FIG. 25.- Dimension fractales obtenues par fragmentation expérimentale sur divers objets (D'après Turcotte [1997]).

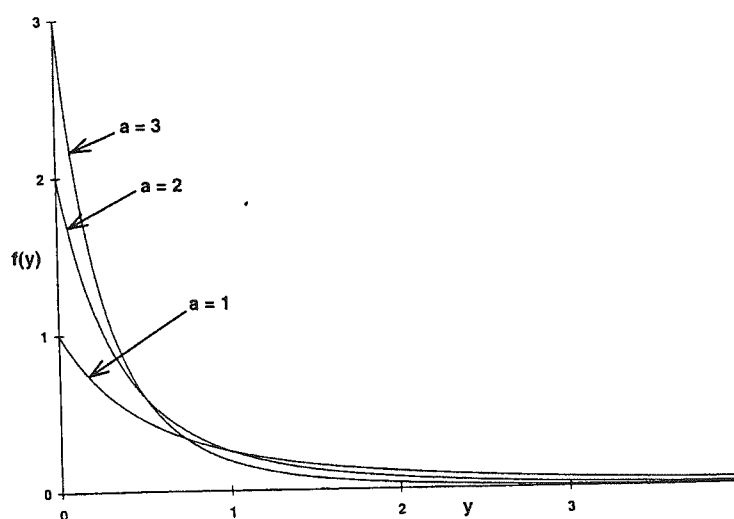


FIG. 26.- La loi de distribution de Pareto $f(x) = \frac{a}{(1+x)^{a+1}}$ pour différentes valeurs de a .

On entend ici par rayon et rayon moyen les valeurs correspondant à la racine cubique du volume du fragment, ce qui équivaut, à une constante près, à ramener préalablement chaque fragment à une sphère de même volume. Comme $e^{-x} \sim 1 - x$ lorsque x tend vers 0, on peut écrire, pour la loi de Weibull, lorsque $(r/r_m)^\alpha$ est suffisamment petit :

$$\frac{M'(r)}{M_T} = \left(\frac{r}{r_m}\right)^\alpha \quad (\text{I.29})$$

ce qui réduit la loi de Weibull, pour $r \ll r_m$, à une distribution fractale. Par analogie entre (I.10) et (I.29), on peut obtenir expérimentalement la dimension fractale D à partir de la mesure du paramètre α [Dubois, 1995 ; Turcotte, 1997], par la relation suivante :

$$D = 3 - \alpha \quad (\text{I.30})$$

La loi de Rosin-Rammler [Rosin et Rammler, 1933] est, elle, définie par :

$$\frac{M'(r)}{M_T} = \exp\left(-\left(\frac{r}{r_m}\right)^\alpha\right), \quad (\text{I.31})$$

où $M'(r)$ est la masse cumulée des fragments de rayon supérieur à r . Elle est entièrement équivalente à celle de Weibull définie en (I.28).

4.3. Le modèle de fragmentation de Sammis *et al.* [1987]

L'observation des lois d'invariance d'échelle dans la fragmentation expérimentale de roches a été faite initialement par Allègre *et al.* [1982], puis reprise par Smalley *et al.* [1985] et Turcotte [1986].

Sammis *et al.* [1987] ont imaginé un modèle capable de rendre compte de la distribution de taille des fragments dans la zone broyée de failles. L'hypothèse de base est que, lors du processus de fragmentation, la rupture est provoquée sur un fragment donné par un autre fragment dont la taille est à peu près similaire. Ce préalable est justifié par le fait qu'il est improbable qu'un bloc de grosse taille provoque la brisure d'un petit fragment, et, surtout, qu'un tel petit fragment entraîne la rupture d'un bloc plus gros. Le contact direct entre deux blocs de taille semblable entraînera donc la cassure de l'un des blocs. Pour concrétiser cette hypothèse, Sammis *et al.* [1987] considèrent le processus suivant :

Un cube d'arête h unité représente l'élément d'ordre zéro. A l'ordre un, il est divisé en 8 cubes d'arête $h/2$. Parmi ces 8 cubes d'ordre un, 2 cubes situés en position diagonalement opposée sont considérés comme définitivement hors jeu dans le processus de fragmentation, et ont donc atteint leur volume minimal. A l'ordre deux, chacun des 6 cubes restants d'ordre un

est divisé de nouveau en 8 cubes d'arête $h/4$. On retire du processus 2 cubes diagonaux d'arête $h/4$ sur chacun des 6 cubes restants. On obtient ainsi 12 cubes restants d'ordre deux, etc (fig. 27).

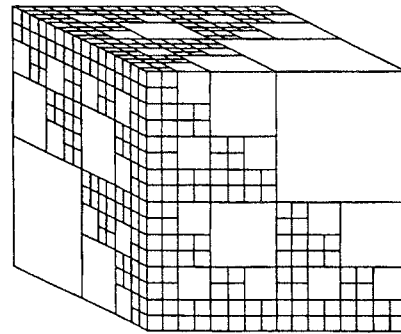


FIG. 27.- Le modèle de fragmentation de Sammis *et al.* [1987].

Par construction, nous pouvons déduire la dimension fractale de cet objet. A l'ordre i , le nombre N_i de cubes d'arête r_i est le suivant :

i	r_i	N_i	Nc_i
1	$h/2$	2	2
2	$h/4$	12	14
3	$h/8$	72	86

ce qui nous donne $D = \ln 6 / \ln 2$, soit $D = 2,5850$. Cette valeur correspond à la dimension fractale d'un ensemble discret. Elle n'est de ce fait pas comparable à la dimension obtenue expérimentalement dans le tableau de la figure 25. Pour obtenir une grandeur comparable, considérons les nombres cumulés Nc_i de blocs de taille supérieure ou égale à une taille donnée pour les trois premiers ordres. Un ajustement linéaire en coordonnées bilogarithmiques (fig. 28) permet ainsi d'obtenir $D = 2,601$, valeur à la fois proche de celle de l'ensemble discret et compatible avec les observations du tableau de la figure 25.

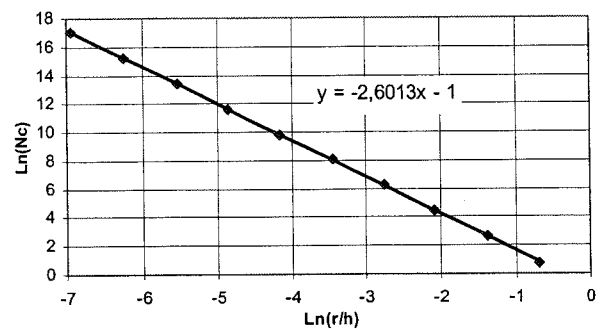


FIG. 28.- Détermination de la dimension fractale par le nombre cumulé Nc de blocs de dimension linéaire r en coordonnées bilogarithmiques dans le modèle de Sammis *et al.* [1987]. D'après Turcotte [1997]. La dimension linéaire correspond à la mesure de la racine cubique du volume. C'est, à une constante près, le volume de la sphère de même volume que le bloc.

4.4. Le modèle de fragmentation du « cube d'Allègre »

Allègre *et al.* [1982] et Turcotte [1986] ont tenté, à partir d'un modèle de fragmentation élémentaire, d'exprimer la dimension fractale en fonction de la probabilité de fragmentation p de chaque élément constitutif du modèle. Les auteurs partent d'un ensemble de N_0 cubes d'arête h et de volume V_0 . Chaque cube peut se fragmenter en 8 cubes d'arête $h/2$ et de volume $V_1 = \frac{1}{8}V_0$, lesquels peuvent donner à leur tour 8 cubes d'arête $h/4$ et de volume $V_2 = \frac{1}{8}V_1$, et ainsi de suite (fig. 29).

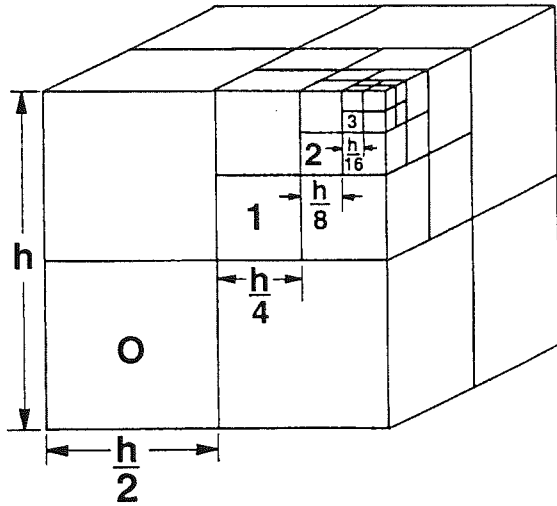


FIG. 29. – Les quatre premiers stades de la fragmentation dans le modèle du cube d'Allègre *et al.* [1982]. D'après Allègre *et al.* [1982] et Turcotte [1986].

L'hypothèse fondamentale est que la probabilité p pour qu'une cellule cubique se fragmente en 8 éléments reste la même à tous les stades successifs de fragmentation, de façon à respecter l'invariance d'échelle dans le processus.

A l'ordre zéro, le processus de fragmentation des N_0 cubes d'arête h engendre $N_1 = 8pN_0$ cubes d'arêtes $h/2$, et laisse $N_{0a} = (1-p)N_0$ cubes d'arête h non fragmentés (fig. 30).

A l'ordre un, on considère les N_1 cubes d'arête $h/2$, et on répète le mécanisme sur ces cubes, pour obtenir $N_2 = 8pN_1 = (8p)^2 N_0$ cubes d'arête $h/4$. On laisse de côté $N_{1a} = N_1(1-p) = 8p(1-p)N_0$ cubes non fragmentés.

A l'ordre n , le nombre de cubes d'arête $h/2^n$ est alors :

$$N_{na} = (1-p)(8p)^n N_0 = (8p)^n N_{0a} \quad (\text{I.32})$$

et le nombre total de fragments est :

$$N = N_0(1-p)[1 + 8p + (8p)^2 + \dots + (8p)^n] \quad (\text{I.33})$$

La dimension fractale de ce système peut être calculée de la façon suivante. Le volume du cube d'ordre n est

$$V_n = \frac{V_0}{8^n} \quad (\text{I.34})$$

d'où, en prenant les logarithmes,

$$\ln \frac{V_n}{V_0} = -n \ln 8 \quad (\text{I.35})$$

De la même façon, (I.32) permet d'écrire :

$$\ln \frac{N_{na}}{N_{0a}} = n \ln 8p \quad (\text{I.36})$$

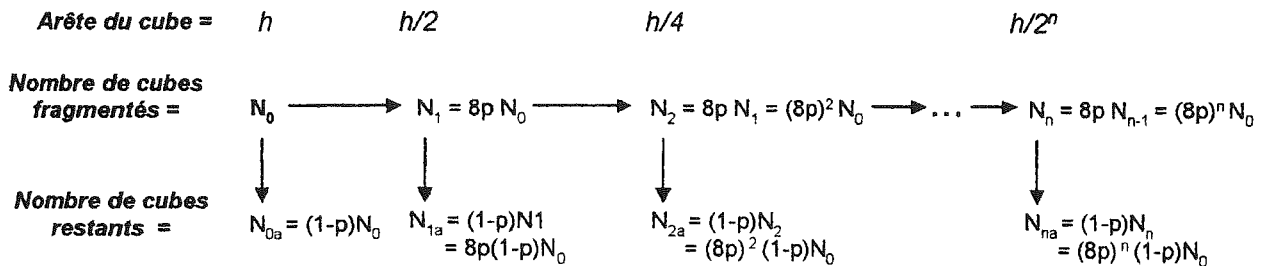


Fig. 30. – Le processus de fragmentation dans le modèle du cube d'Allègre.

En éliminant n dans (I.35) et (I.36), on obtient :

$$\ln \frac{N_{na}}{N_{0a}} = - \ln \left(\frac{V_n}{V_0} \right) \frac{\ln 8p}{\ln 8},$$

soit

$$\frac{N_{na}}{N_{0a}} = \left(\frac{V_n}{V_0} \right)^{-\frac{\ln 8p}{\ln 8}} \quad (\text{I.37})$$

En notant que $V \sim r^3$,

$$\frac{N_{na}}{N_{0a}} = \left(\frac{r_n}{r_0} \right)^{-3 \frac{\ln 8p}{\ln 8}} \quad (\text{I.38})$$

L'expression (I.38) caractérise une distribution fractale, dont la dimension est

$$D = 3 \frac{\ln 8p}{\ln 8} = \frac{\ln 8p}{\ln 2} \quad (\text{I.39})$$

Puisque $\frac{1}{8} < p < 1$, la dimension D est strictement inférieure à 3. Elle est représentée sur la figure 31.

En représentant la distribution des volumes, on peut obtenir également la dimension fractale. Celle-ci est donnée par $3.|a|$, où a est la pente de la droite tracée en coordonnées bilogarithmiques (fig. 32).

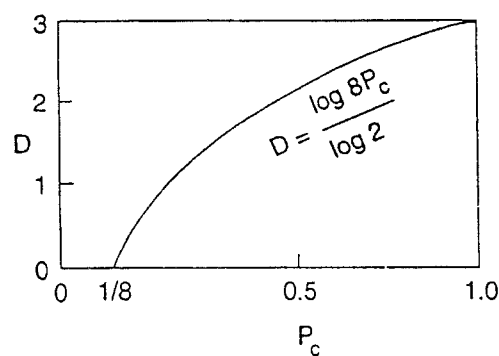


FIG. 31.- L'expression de la dimension fractale D en fonction de la probabilité de fragmentation P_c d'une cellule, dans le modèle du cube d'Allègre [Turcotte, 1986].

4.5. Les modèles du « pilier sain » et du « plan de fragilité »

Au-delà de la relation dimension fractale-probabilité traitée ci-dessus, Allègre *et al.* [1982], puis Turcotte [1986] ont élaboré un modèle destiné à donner un sens physique à la probabilité de rupture. Ils ont utilisé dans ce but l'approche par les groupes de renormalisation proposée par Madden [1976]. Le principe de cette méthode consiste à considérer un système relativement simple à une échelle minimale, puis à « renormaliser » le problème, c'est-à-dire à utiliser le même dispositif transcrit à l'échelle immédiatement supérieure. On répète alors le processus de proche en proche vers les échelles plus grandes. Ce procédé, on le devine, impose souvent un comportement fractal au système en mettant en œuvre de façon explicite l'invariance d'échelle [Turcotte, 1997].

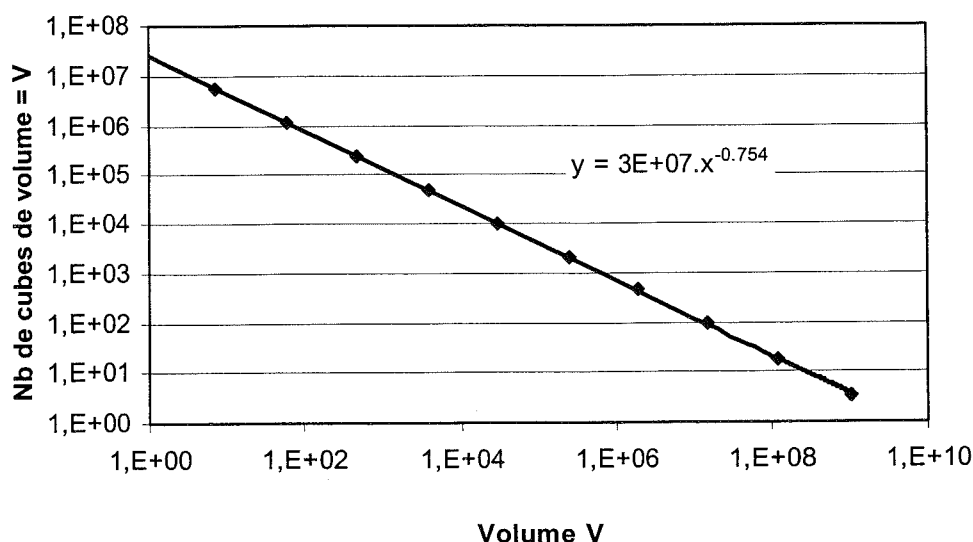


FIG. 32.- Expérience du Cube d'Allègre. Représentation du nombre de cubes de volume V . 8 blocs initiaux. Longueur d'arête 1000 unités. Probabilité $p=0,6$. On obtient une droite de pente $p \approx -0,754$. D'où, d'après l'équation (I.37), la valeur de $D \approx 3 \times 0,754 \approx 2,26$, qui correspond à la formule (I.39).

On considère une cellule du 1^{er} ordre constituée par 8 éléments cubiques. A cette cellule du 1^{er} ordre doit être affectée une certaine solidité. Allègre *et al.* [1982], dans leur modèle du « pilier sain », proposent d'attribuer à chacun des éléments cubiques constitutifs un caractère soit fragile, soit sain. Ils considèrent alors la cellule du 1^{er} ordre comme solide lorsqu'une de ses arêtes au moins est constituée de deux éléments sains (fig. 33).

A l'aide de cette hypothèse, on peut examiner la solidité d'une cellule de 1^{er} ordre. Chaque cellule peut comporter de 0 à 4 éléments fragiles, ce qui autorise $2^8=256$ combinaisons. Compte tenu des propriétés du groupe de symétrie du système cubique, on peut réduire ces 256 combinaisons à 22 configurations topologiques distinctes (fig. 34). Parmi celles-ci, les configurations 4f, 5c, 6b, 6c, 7 et 8 sont fragiles.

On compte ainsi, parmi les cellules d'ordre 1 fragiles (configurations soulignées figure 34) :

- 1 combinaison comportant 8 éléments fragiles,
- 8 combinaisons comportant 7 éléments fragiles,

- 4+12=16 combinaisons à 6 éléments fragiles,
- 8 combinaisons à 5 éléments fragiles, et
- 2 combinaisons à 4 éléments fragiles.

(I.40)

Si l'on désigne par p_0 la probabilité pour qu'un élément d'une cellule soit fragile, et par p_1 la probabilité pour que la cellule soit fragile, la probabilité pour que les 8 éléments d'une cellule soient fragiles est p_0^8 . Pour que 7 éléments soient fragiles et 1 solide, cette probabilité est $p_0^7(1-p_0)$, etc...Compte tenu de (I.40), on peut alors exprimer p_1 en fonction de p_0 :

$$p_1 = p_0^8 + 8p_0^7(1-p_0) + 16p_0^6(1-p_0)^2 + 8p_0^5(1-p_0)^3 + 2p_0^4(1-p_0)^4$$

$$= p_0^4(3p_0^4 - 8p_0^3 + 4p_0^2 + 2) \quad (\text{I.41})$$

La renormalisation fait que l'on peut transcrire la formule pour des ordres supérieurs n et $n+1$ quelconques :

$$p_{n+1} = p_n^4(3p_n^4 - 8p_n^3 + 4p_n^2 + 2) \quad (\text{I.42})$$

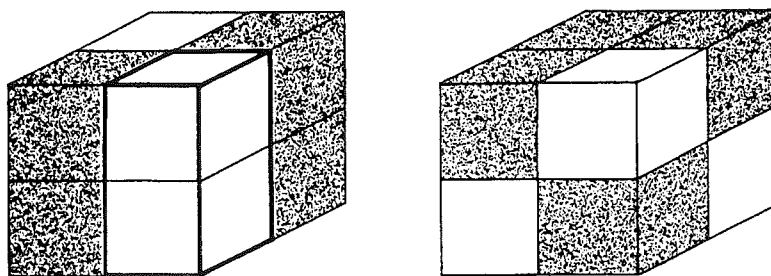


FIG. 33.— Illustration du critère de fragilité dans le modèle du pilier sain [Allègre *et al.*, 1982]. La cellule est solide lorsqu'une de ses arêtes au moins est constituée de deux éléments sains (en blanc). La cellule de gauche est solide et montre un « pilier sain » (contour souligné), celle de droite est fragile.

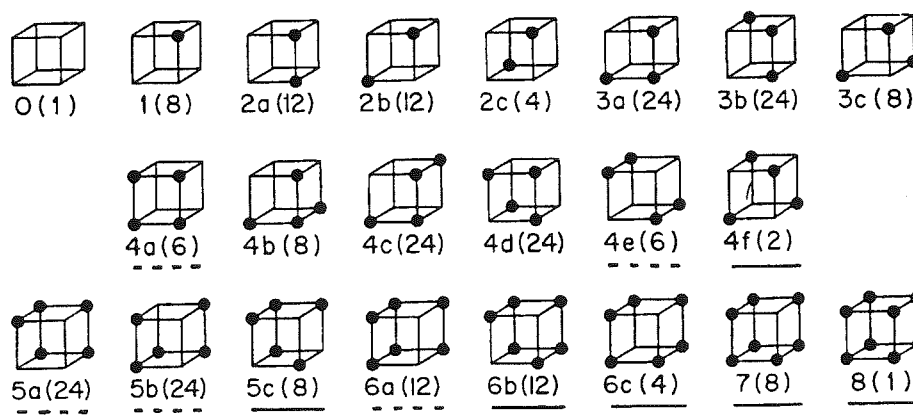


FIG. 34.— Les 22 configurations topologiques différentes dans les modèles du pilier sain [Allègre, 1982] et du plan de fragilité [Turcotte, 1986]. Les éléments fragiles sont repérés par des points. Le premier nombre sous la configuration indique le nombre d'éléments fragiles. La lettre distingue les différentes configurations avec un même nombre d'éléments fragiles, et le nombre entre parenthèses donne le nombre de combinaisons correspondant à cette configuration topologique. Les configurations fragiles sont soulignées en trait plein pour le modèle du pilier sain, en pointillés pour le modèle du plan de fragilité (d'après Turcotte [1997]).

ce qui amène à considérer l'application f qui permet de passer d'un stade au suivant, définie par :

$$\forall x \in [0,1], f(x) = x^4 \cdot (3x^4 - 8x^3 + 4x^2 + 2) \quad (I.43)$$

Sur le domaine de définition de f , cherchons les points invariants. Ceux-ci sont tels que :

$$\forall x \in [0,1], x=f(x)=x^4 \cdot (3x^4 - 8x^3 + 4x^2 + 2) \quad (I.44)$$

En mettant en facteur les 2 racines évidentes 0 et 1 de cette équation, on obtient :

$$x \cdot (x - 1) \cdot (3x^6 - 5x^5 - x^4 - x^3 + x^2 + x + 1) = 0 \quad (I.45)$$

Pour le troisième facteur, la résolution numérique montre l'existence d'une seule racine sur l'intervalle $[0,1]$, $x_C \approx 0,895980$, qui est le 3^{ème} point invariant. On peut ainsi tracer la fonction f (fig. 35).

Le graphe montre une inflexion pour $x = x_C$. On peut prévoir sur ce graphe le comportement de l'objet lorsque l'ordre n tend vers l'infini, en reproduisant graphiquement la composée d'ordre n de f . Ainsi, le tracé flèche porté sur la figure 35 indique l'évolution du système pour une valeur initiale de p_0 égale à 0,6. Les valeurs suivantes de la probabilité de fragmentation sont $p_1 = 0,2723$, puis $p_2 = 0,0118$, $p_3 = 3,91 \cdot 10^{-8}$, $p_4 = 4,66 \cdot 10^{-30}$, etc...

Pour $x < x_C$, la probabilité tend vers 0, donc la fragilité décroît et le système reste solide.

De la même façon, pour $x > x_C$, on voit que la probabilité tend vers 1 ; le modèle évolue spontanément vers une complète fragilité.

La valeur $x = x_C$ correspond à une valeur critique de la probabilité, pour laquelle on a une bifurcation dans la solution, qui nous rappelle le comportement de la suite de May [1976]. Ainsi, les points fixes $x = 0$ et $x = 1$ sont des attracteurs ponctuels, et la divergence dans l'évolution de deux points infiniment voisins de $x = x_C$ peut traduire le concept de sensibilité aux conditions initiales. Le graphe d'une telle application non-linéaire unidimensionnelle $p_{n+1} = f(p_n)$, ou $x_{i+1} = f(x_i)$ nommée *application de premier retour* par les physiciens, permet de mettre en évidence un comportement chaotique.

Pour la valeur $x = x_C$, la probabilité p_C reste la même à tous les ordres de fragmentation, c'est donc la valeur initiale p dont il est question au paragraphe précédent. Il est donc légitime de remplacer, dans l'équation I.39, p par p_C . On obtient ainsi la valeur de la dimension fractale pour le modèle du pilier sain :

$$D \approx 2,8415 \quad [\text{Turcotte et al., 1986}] \quad (I.46)$$

Le modèle du plan de fragilité, dû à Turcotte [1986] est similaire. Le critère de fragilité est différent : on considère qu'une cellule est fragile lorsque les éléments fragiles forment un plan qui la traverse. On parvient ainsi, avec la même démarche, à calculer la probabilité de fragilité d'une cellule d'ordre $n+1$:

$$p_{n+1} = p_n^4 (3p_n^4 - 32p_n^3 + 88p_n^2 - 96p_n + 38) \quad (I.47)$$

ce qui permet d'obtenir une probabilité critique $p_C = 0,4901$, laquelle donne pour le modèle du plan de fragilité une valeur de la dimension :

$$D \approx 1,971 \quad [\text{Turcotte et al., 1986}] \quad (I.48)$$

Le graphe correspondant est présenté figure 36.

Les approches décrites ci-dessus sont intéressantes à prendre en compte dans l'élaboration d'un processus génétique de fracturation. Elles sont par contre inaptes à reproduire des modèles dont la visualisation en coupes satisfait le géologue structuraliste. S'il est topologiquement possible d'assimiler un modèle synthétique produit par les principes exposés ci-dessus et un modèle géométrique basé sur l'observation du réel, d'un point de vue global, les images produites sont trop différentes pour être qualifiées d'équivalentes. Allègre [1982] et Turcotte [1986] se gardent bien d'ailleurs d'une telle comparaison, préférant rester au niveau de l'ajustement d'une loi de distribution des tailles de fragments, comme si l'assemblage spatial de ceux-ci n'avait pas d'importance. C'est ce deuxième aspect que nous traitons dans les paragraphes qui suivent.

5.- ASSEMBLAGE MULTISCALEAIRE DE BLOCS : RÉSULTAT ULTIME DU PROCESSUS DE FRACTURATION

5.1. Observation de quelques réseaux en coupes

La caractérisation du milieu repose d'abord sur une *description* aussi fidèle que possible des différents aspects du système de fractures en termes géométriques. L'observation de terrain, si elle est pratiquement toujours limitée à une ou deux dimensions, peut néanmoins aider à la définition de grands principes. Nous analyserons ici quelques exemples 2D révélateurs, issus de surfaces d'affleurements.

La figure 37 montre une surface de banc dans des grès du Lancashire [Gillespie et al., 1993], qui a été particulièrement nettoyée pour l'observation des fractures décimétriques à décamétriques. On y observe trois familles de fractures dont les traces sont orientées NNW-SSE, NNE-SSW et WNW-ESE. Du point de vue de la géométrie du réseau en 2D, on peut retenir les conclusions suivantes :

- Ces traces sont grossièrement linéaires, indiquant que les fractures sont des surfaces planes ;
- Elles forment un réseau globalement connecté. Plus précisément, on peut noter que les traces de fractures les plus longues se terminent essentiellement sur d'autres fractures. Inversement, les fractures librement terminées dans la roche sont de faible extension ;
- Les fractures sont, en partie, organisées en « amas », ou zones plus densément fracturées.

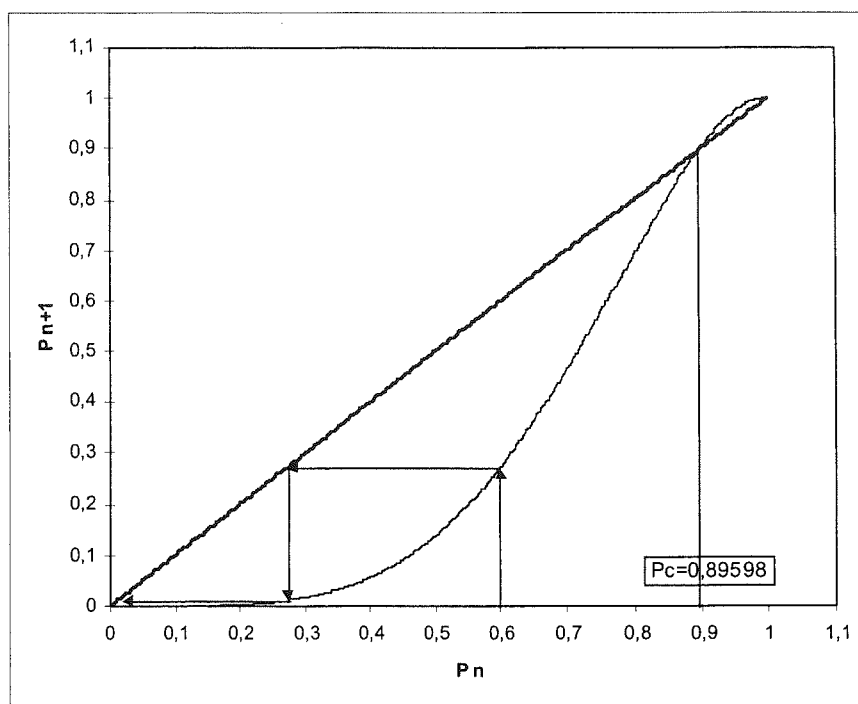


FIG. 35.— Modèle du pilier sain (d'après Allègre [1982]). Graphe de l'application de premier retour. A partir d'une probabilité initiale $p=0,6$, la suite converge vers le point fixe 0. Pour $p > P_c$, elle converge vers 1. $p=P_c$ est la probabilité de fragmentation catastrophique.

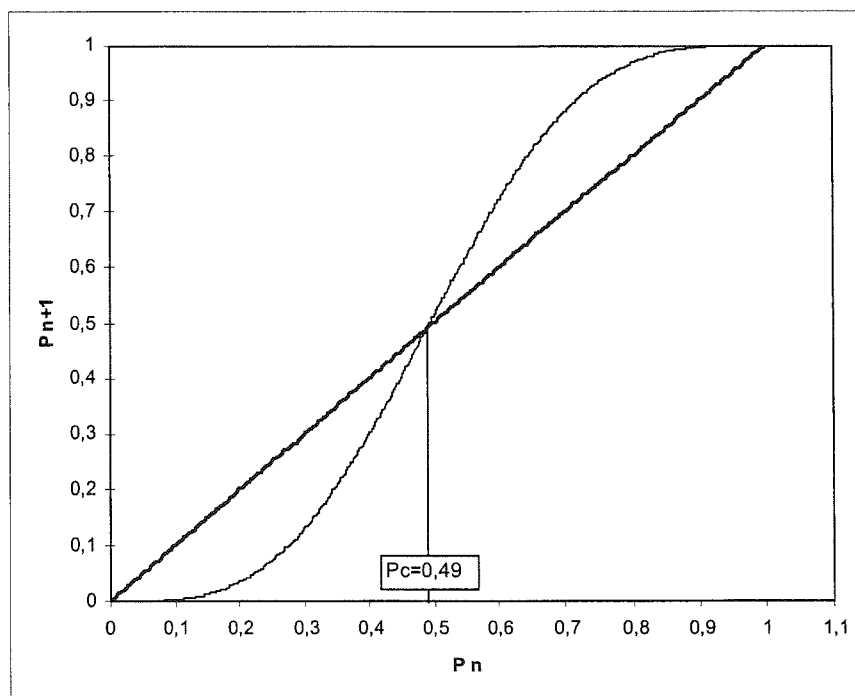


FIG. 36.— Modèle du plan de fragilité (d'après Turcotte [1986]). Graphe de l'application de premier retour. $p=P_c$ est la probabilité de fragmentation catastrophique.

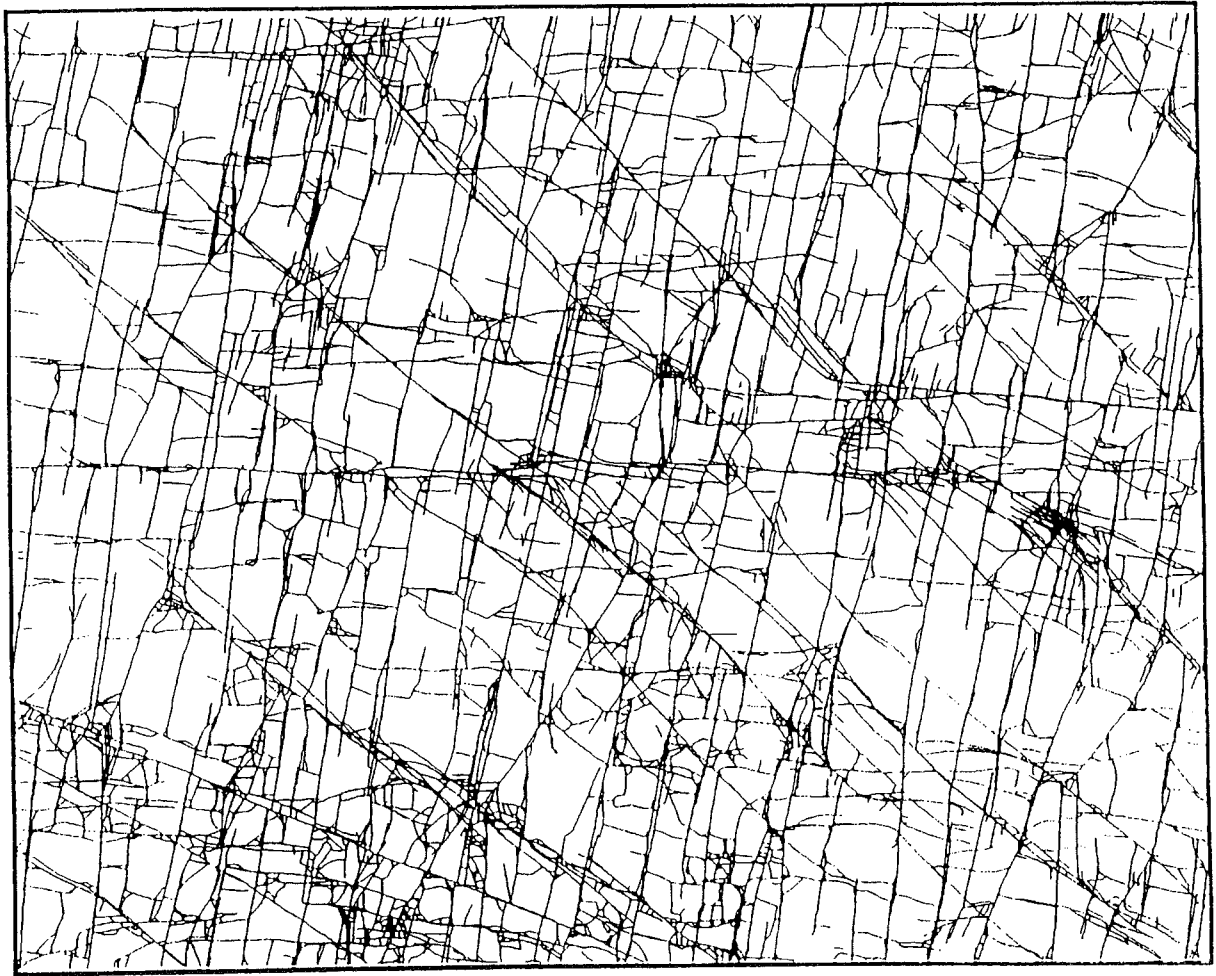


Fig. 37.— Joints sur une surface de banc de grès, Whinney Hill Quarry, Lancashire, Grande-Bretagne [Gillespie *et al.*, 1993]. Les joints délimitent des blocs, et forment un réseau très connecté.

Un second exemple est dû à Barton *et al.* [1995] dans les tufs du Nevada, (fig. 38). Ceux-ci sont affectés par un réseau de discontinuités dont la connectivité est pratiquement totale. Sur la coupe, les fractures apparaissent linéaires ou plus ou moins ondulées autour d'une direction constante ; elles délimitent des polygones de tailles variables, dont la très grande majorité sont convexes.

Dans ces deux figures, on observe la présence, plus marquée sur la figure 37, de discontinuités d'extension plus importante, recoupant un nombre variable d'autres fractures. La figure 39 illustre l'invariance d'échelle de la fracturation, dont l'analyse a été faite en grand détail par Barton [1995]. Les fractures relevées sur ce site se présentent comme des discontinuités quasiment linéaires, généralement interconnectées, éventuellement recoupantes, et parfois agglomérées en amas (fig. 39c et surtout fig. 39d).

Bien que les exemples étudiés avec autant de détail ne soient pas très nombreux dans la littérature, d'autres exemples auraient pu être présentés et nous auraient

amenés à faire des remarques similaires.

5.2. Instabilité des terminaisons libres

Les réseaux de fractures nous apparaissent en coupes sous la forme d'images instantanées. Il faut cependant considérer avec attention l'évolution temporelle de tels réseaux. Un champ de fractures s'étend, quelle qu'en soit l'échelle, par initiation de nouvelles discontinuités au sein de la roche, et surtout par croissance des discontinuités existantes. La naissance de nouvelles fractures dans la roche se fait en des points où les micro-discontinuités affaiblissent la structure. L'extension de fractures existantes correspond à la canalisation de nouvelles contraintes dans la zone de fragilité préexistante que constitue le plan de fracture : on connaît en tectonique le rejeu préférentiel des accidents anciens. Du point de vue géométrique, ce constat nous amène à considérer la fracture comme une portion de surface dont la mesure n'est valable qu'à l'instant t . Lors de la mise en jeu d'énergie, cette surface s'étendra, en traversant éventuellement d'autres discontinuités. Puis, l'énergie faiblissant, à la rencontre d'une $n^{\text{ième}}$

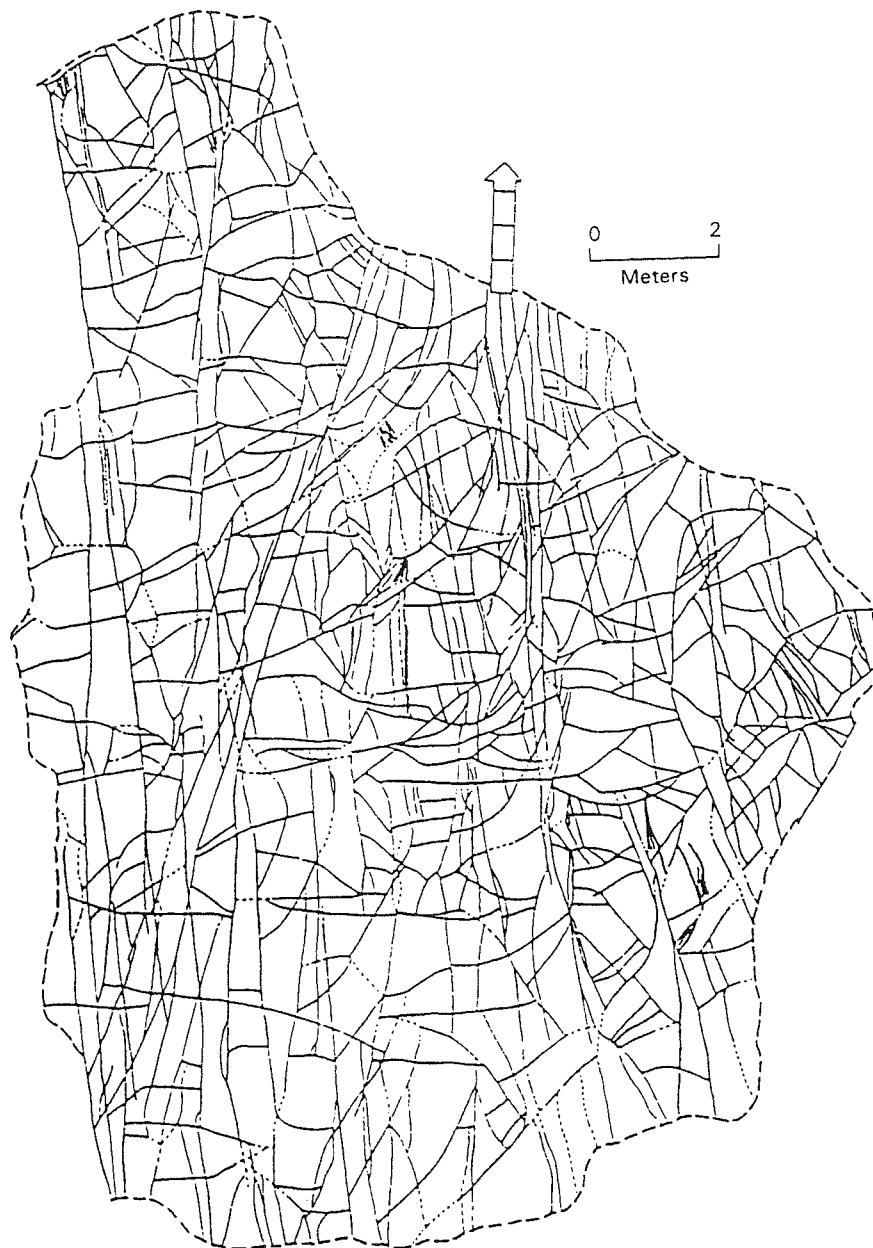


FIG. 38.— Surfaces structurales montrant un réseau de joints dans les tufs miocènes de Yucca Mountain, Nevada, Etats-Unis [Barton, 1995].

discontinuité, il est probable que l'énergie résiduelle au point de connexion sera dissipée le long du plan de fracture sécant. La fracture prendra alors fin sur cette discontinuité existante (fig. 40).

Cette remarque nous amène à conclure que les réseaux de fractures évoluent naturellement et nécessairement vers la connexion totale, qui constitue un « point bas » énergétique correspondant donc à une stabilité relative plus importante du réseau. Dans cette optique, nous envisageons donc les fractures « libres » comme des structures dont l'existence n'est que transitoire, et qui évoluent nécessairement à terme vers des fractures connectées. Ceci nous permet donc de considérer les fractures à terminaison libre comme potentiellement connectées au reste du réseau.

Un tel type de réseau connecté est nécessairement constitué d'un assemblage de blocs, à l'image des résultats présentés ci-dessus.

Des deux constats précédents – fractures planes dans un réseau connecté – il ressort que *les polygones du pavement peuvent être considérés comme convexes*. En effet, géométriquement, la production d'une surface fermée concave limitée par des segments rectilignes implique un angle rentrant (fig. 41a). Cet angle rentrant, qui est mécaniquement le lieu d'une certaine instabilité, limite alors deux fractures librement terminées au sein de la roche. En rejetant cette solution, on s'interdit donc l'existence de polygones concaves (fig. 41b).

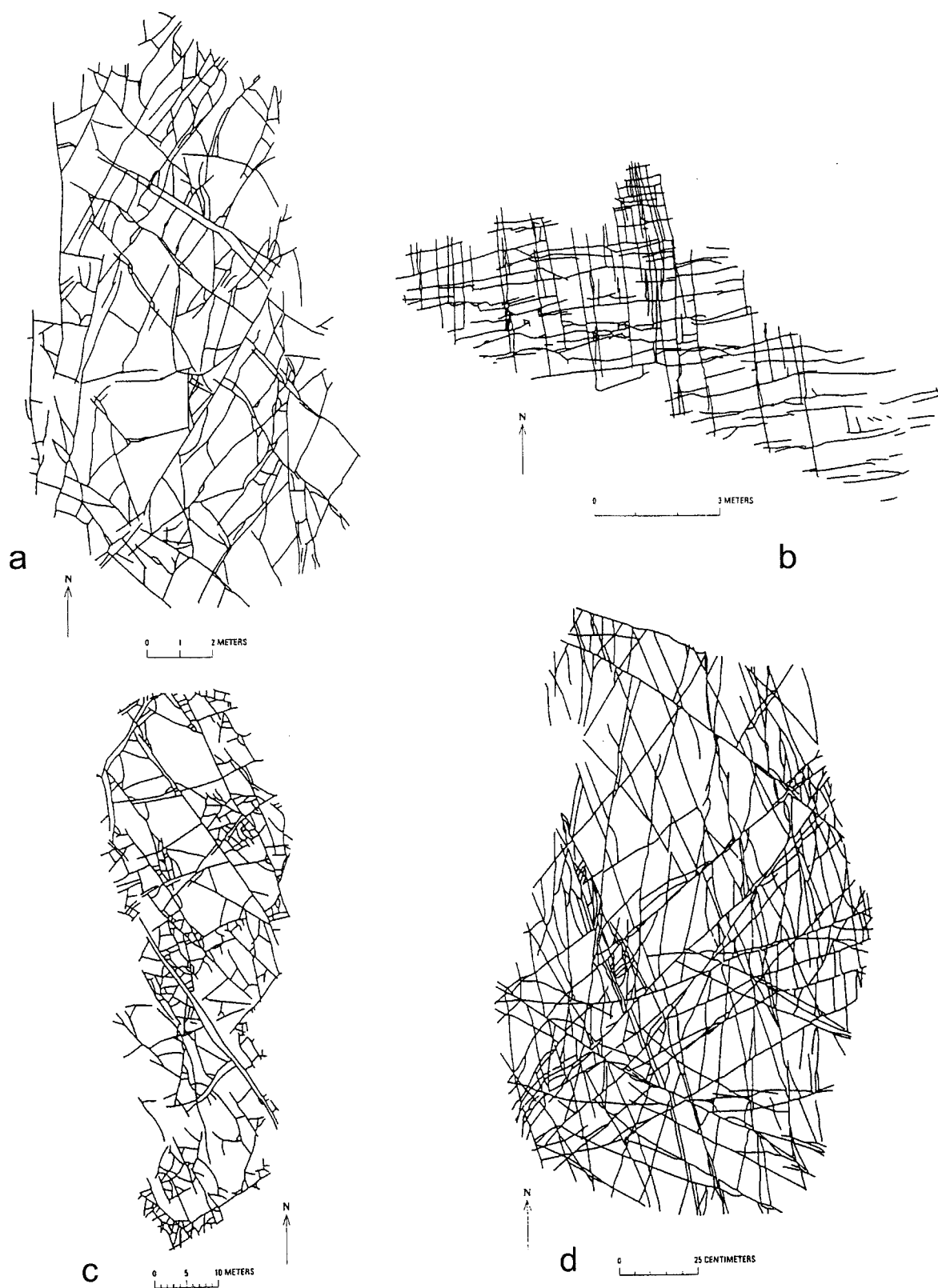


Fig. 39.— Réseaux de joints dans les grès permien de Morison, Connecticut, Etats-Unis, vus à différentes échelles [Barton, 1995].

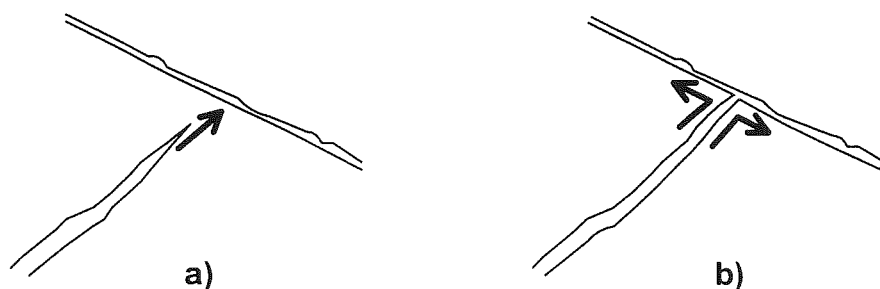


FIG. 40.- Schéma de l'extension d'une fracture. a) Une fracture est en voie de croissance. L'énergie disponible est utilisée à la progression (flèche). b) A la rencontre d'une discontinuité, cette énergie est d'abord dissipée dans le plan de la fracture rencontrée (flèches).

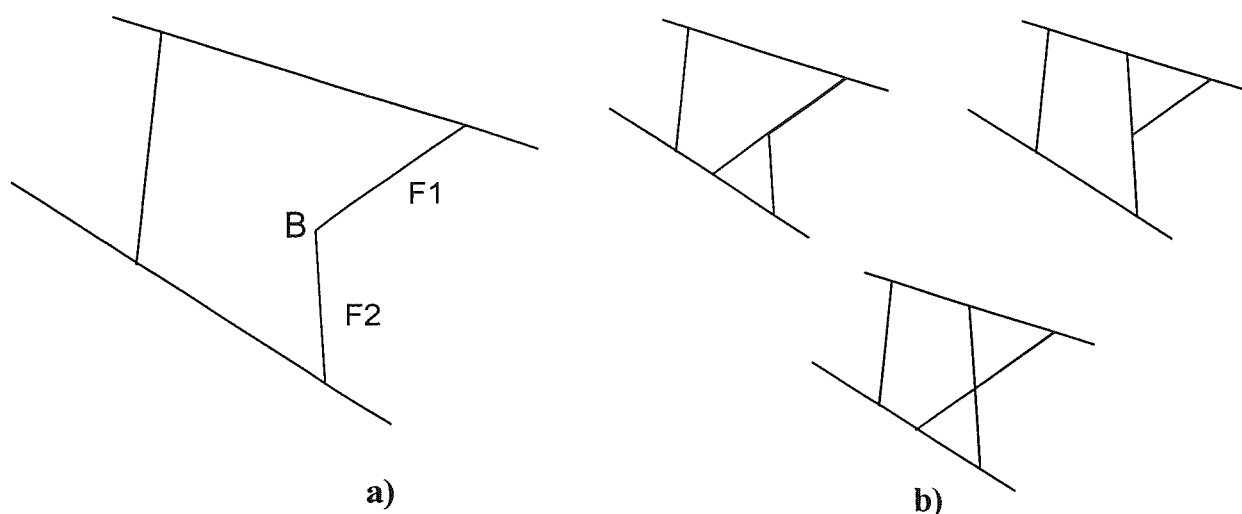


FIG. 41.-a) Génération d'une surface fermée concave limitée par des segments linéaires. La production d'une surface fermée concave n'est possible qu'en traçant un angle rentrant en B. Ce point B correspond en 3D à la terminaison libre des fractures F1 et F2 délimitant le bloc. b) Les 3 solutions possibles correspondant à la figure (a) si l'on ne crée pas de terminaison libre.

6.- CONCLUSION

La complexité du phénomène de fracturation impose la représentation plus ou moins schématisée par des modèles, que nous avons rangés en deux familles.

Les modèles « équivalents », censés schématiser un fonctionnement précis dans des conditions déterminées, tentent de pallier aujourd'hui la méconnaissance du milieu fracturé à tous les niveaux d'échelle. Mais comme nous l'avons montré plus haut, le choix des paramètres équivalents (le VER par exemple) et la recherche de leur domaine physique de définition sont handicapés par le fait qu'on ne connaît pas ce volume *a priori*.

Les modèles descriptifs dont il a été question plus haut ont pour but la recherche d'une meilleure caractérisation du milieu fissuré. Cette recherche a d'abord pour cible le massif dans son ensemble avec l'approche du structuraliste de terrain, puis le réseau à

diverses échelles, puis enfin la fracture elle-même : Billaux [1990] modélise la circulation fluide en accord avec les travaux de Gentier [1986], qui ont montré l'établissement préférentiel, au sein de la fracture, de chenaux liés à la rugosité du plan de fracture. Cacas [1989] souligne elle aussi la nécessité d'un recours à une description fine des hétérogénéités de surface de la fracture, qui peuvent seules rendre compte des phénomènes de turbulence localisés et complexes. La voie de l'analyse géométrique des réseaux et des fractures paraît ainsi prometteuse en elle-même. Elle est encore mal explorée en trois dimensions, bien que de nombreux travaux concluent en faveur d'une nécessité dans ce domaine : forme des fractures, topologie des blocs délimités par les fractures n'ont guère été étudiés. Il est probable que l'on n'échappera pas, dans les simulations futures, à l'intégration, dans les modèles numériques de la fracturation, des données descriptives de ces niveaux de détail. L'évolution exponentielle des moyens informatiques est évidemment un facteur très favorable à cette voie de recherche.

Le modèle que nous proposons s'inscrit dans cette seconde approche, descriptive. A ce titre, il veut reproduire, de façon raisonnablement simplifiée la géométrie des réseaux de fractures en partant de l'observation d'éléments structuraux naturels. De l'observation des surfaces fracturées présentées dans ce chapitre, et des champs de fractures en général, nous pouvons tirer les conclusions convergentes suivantes :

En premier lieu, dans la majorité des cas, *les discontinuités apparaissent sous la forme de segments linéaires*, de longueurs variables. La linéarité des traces en 2D révèle un aspect planaire des surfaces de fractures, ce que confirme souvent l'observation de terrain. Même si la figure 38 montre, il est vrai, un nombre non négligeable de traces incurvées, de tels cas sont effectivement moins fréquents à l'échelle macroscopique. Notons qu'au niveau microscopique, la planéité des surfaces de fractures n'est plus vraisemblable, et notre hypothèse constitue à cette échelle une simplification radicale.

En second lieu, *les traces observées sont majoritairement géométriquement liées les unes aux autres*. Ces relevés nous présentent en effet très peu de fractures prenant fin au sein de la roche (terminaisons libres). Cette observation de connectivité, pour laquelle on pourrait multiplier les exemples, nous permet d'envisager chacune de ces représentations 2D, non plus comme un milieu parcouru par des discontinuités, mais plutôt comme un pavement de polygones contigus, de tailles variables. Ceci conduit à négliger dans ces images l'existence des fractures librement terminées. Nous justifions cette simplification par des considérations mécaniques, en précisant notre conception du rôle des terminaisons libres dans la fracturation. Durant la phase de création d'une discontinuité au sein de la roche, il y a accumulation de contraintes au niveau de l'extrémité de cette discontinuité. L'extrémité libre d'une fracture constitue un point critique qu'une faible excitation mécanique suffit à activer. On peut donc considérer comme fortement probable l'existence d'une extension

au moins potentielle de la discontinuité dans la roche au-delà de la fracture visible. Cette extension est parfois exprimée de façon latente, à une échelle inaccessible à la résolution des outils de relevé. Dans cette approche, l'existence de fractures à terminaisons libres sur les sections 2D peut ainsi être attribuée à un sous-échantillonnage dans l'observation.

Ces deux aspects bidimensionnels nous permettent raisonnablement d'assimiler les surfaces d'observation fracturées à des pavements de polygones convexes. Nous pouvons extrapoler à trois dimensions la conséquence de cette simplification. Le pavement de polygones convexes observé en deux dimensions correspond donc à un assemblage spatial de blocs contigus et convexes. Nous allons donc tenter dans notre modélisation de produire et décrire des *assemblages de blocs convexes*.

Un tel modèle tridimensionnel est en mesure de fournir des possibilités d'investigations variées.

Du point de vue strictement théorique, la caractérisation de différents types de réseaux est possible par l'étude de lois de distribution en une, deux et trois dimensions. L'hypothèse d'invariance d'échelle peut être facilement testée pour différents paramètres par l'existence d'une géométrie fractale. Ces points sont abordés dans notre Seconde Partie. Au-delà de notre travail, l'exploration du modèle devrait également favoriser la caractérisation des réseaux de fractures comme résultats de phénomènes chaotiques, par le biais des outils d'analyse multifractale.

D'un point de vue plus pratique, l'aide d'un outil de ce type est indéniable dans la validation d'hypothèses formulées dans les modèles et la comparaison avec les données de terrain. Ainsi, une étude volumétrique précise des blocs découpés est à même d'aider à la validation d'un volume élémentaire représentatif, avec l'optique éventuelle d'établir une relation entre la conformation physique du réseau et le VER correspondant. Notre Troisième Partie présente deux exemples d'applications de notre modèle de blocs.

SECONDE PARTIE

DESCRIPTION ET EXPLORATION THÉORIQUE DU MODELE

Nous avons démontré dans la première partie de ce travail tout l'intérêt d'une modélisation descriptive qui rendrait compte des éléments constitutifs d'un système de fractures.

Nous allons, dans cette seconde partie, décrire le modèle que nous avons construit et en analyser quelques conséquences sur le plan théorique.

1. – DESCRIPTION DU MODÈLE OBSIFRAC

Décrire géométriquement le milieu fracturé à travers un modèle suppose que l'on traduise deux types d'informations :

- *l'information portée par les éléments géométriques constituant le réseau de fractures* : Les entités géométriques élémentaires observables dans le milieu naturel ont été choisies pour décrire le réseau d'une manière *statique*. Ces entités ont été matérialisées dans le modèle, et rendues accessibles et manipulables une à une. Elles ont été caractérisées uniquement par leurs propriétés géométriques dans le cadre de ce travail,

- *l'information qui traduit le comportement global du milieu rocheux dans son ensemble* : Le modèle a été enrichi de règles qui régissent l'aspect *dynamique* de la fracturation. Des lois de comportement physique mises en œuvre à diverses échelles donnant ainsi la possibilité de traduire des propriétés du milieu lui-même.

Nous aborderons successivement comment nous avons tenté de rendre compte de ces deux aspects à travers notre modèle.

1.1. Description statique

Après avoir situé le travail dans son environnement informatique, nous décrirons dans cette partie les entités utilisées.

1.1.1. Conception et implémentation du modèle OBSIFRAC

1.1.1.1. Conception « objet » par la méthode OMT

La perspective de bâtir un outil de simulation nécessairement ouvert puisque généraliste nous a fait choisir une méthode de conception et de programmation de type « objet » pour l'élaboration de notre modèle OBSIFRAC (*Modèle « OBjet » pour la SIMulation de la FRACTuration*).

Nous donnons ci-après un bref aperçu du cadre méthodologique de la conception « orientée objet ». Pour plus de détails, on pourra se reporter par exemple à deux ouvrages fondateurs (Méthode OMT : [Rumbaugh, 1995] et méthode OOD : [Booch, 1994]).

La conception orientée objets observe que chaque environnement est composé d'*objets*, ou entités qui ont un sens dans le contexte. Ces objets doivent leur propriétés et leur comportement à leur appartenance à une ou plusieurs catégories, nommées *classes*.

La classe est l'unité sémantique qui détient le comportement des objets sous la forme d'un ensemble de services (*méthodes*) qu'elle peut leur offrir et des propriétés (attributs) qu'elle possède. Les objets sont les *instances* (ou occurrences) d'une classe. Une classe est dite *persistante* lorsque les objets de cette classe font l'objet d'un stockage sur un support physique informatique. On garde ainsi l'historique des objets d'une telle classe et de leurs états successifs.

Ainsi, chaque objet correspond à une entité autonome de fonctionnement et peut accéder aux méthodes de sa classe, qui lui permettront de réaliser des traitements, ou de communiquer avec d'autres objets par le moyen de méthodes spécialisées nommées *messages*. L'approche objet prévoit des relations entre les classes. Par exemple :

- Une classe peut être définie par une classe de rang supérieur, ou *super-classe* qui lui transmet ses propriétés et son comportement : c'est la notion d'*héritage*. Ainsi, une discontinuité donnée, de type joint, est un *objet* appartenant à la *classe* JOINT. Cette classe JOINT *hérite* certaines propriétés (épaisseur) de la *super-classe* FRACTURE.

- L'instance d'une classe peut être composée de l'instance d'une ou de plusieurs classes : c'est l'agrégation, qui rend compte du fait qu'un objet est composé d'autres objets. Dans l'exemple ci-dessus, la fracture de type joint est représentée en trois dimensions comme un polygone, composé de segments, lesquels peuvent être vus comme des objets de la classe SEGMENT.

- L'héritage évoqué ci-dessus peut donner lieu au polymorphisme. Ce principe permet à un objet d'invoquer par un nom unique une méthode adaptée au contexte. Ainsi, dans le modèle que nous avons élaboré et que nous allons présenter, un bloc est limité par un ensemble de noeuds, qui sont des points de l'espace. La conception objet nous a fait définir pour ce faire deux classes différentes : la classe POINT3D (points de

l'espace), classe de base, et la classe NOEUD (noeuds d'un bloc), classe héritière.

Tout noeud étant un point de l'espace, les objets de la classe NOEUD héritent de la classe POINT3D certaines de leurs propriétés (par exemple les coordonnées x,y,z). D'autres propriétés de la classe NOEUD, en revanche, ne sont pas héritées, mais spécifiques à cette classe : elles complètent l'information de chaque objet de type NOEUD (pointeurs vers les blocs d'appartenance, par exemple)

Parmi les nombreuses approches en conception orientée objet, la méthode OMT (Object Modeling Technique, [Rumbaugh, 1995]) propose un formalisme en trois modèles, comportant des parties communes qui permettent leur validation réciproque.

- Le modèle objets ou modèle statique consiste dans un premier temps à faire l'inventaire du domaine considéré, en termes de classes. Le choix des classes n'est pas nécessairement exhaustif et n'est pas irréversible. Pour chaque classe sont recherchés les attributs, caractérisant chaque objet par leur valeur, puis les méthodes. On identifie ensuite des relations entre les classes, qui peuvent être de trois types :

- association (ou lien) : le polyèdre P « a pour barycentre » le point G
- agrégation (ou composé/composant) : le polyèdre P comporte *n* arêtes...
- héritage (ou spécialisation/généralisation) : un noeud « est un » point de l'espace (cf supra)

Les classes figurées dans ce modèle statique représentent à la fois les objets stockés dans la base de données (classes *persistantes*) et ceux dont l'existence est réelle, mais temporaire, limitée à la mémoire vive de l'ordinateur (classes *non persistantes*).

- Le modèle dynamique est destiné à représenter le comportement dans le temps d'objets en fonction d'événements (que l'on peut regrouper en classes d'événements) qui les concernent. Le comportement d'un objet soumis à un événement se traduit par ses transitions d'état. L'organisation des événements, des états et des transitions d'états pour une classe donnée est représentée par un diagramme d'états.

- Le modèle fonctionnel décrit les traitements réalisés, sans préjuger de l'ordre dans lequel ils sont effectués, avec l'aide de diagrammes à flots de données montrant les transformations subies par les données depuis leur source dans les objets vers leurs destinations dans d'autres objets.

Les deux derniers modèles, dynamique et fonctionnel sont utilisés surtout en informatique industrielle (interfaces temps réel). Ils n'ont pas été utiles dans notre étude et ne sont donc cités ici que pour mémoire.

Le modèle statique présenté (fig. 42) est simplifié. Entre autres, ne figurent pas sur ce modèle toutes les méthodes des classes. Seules les classes persistantes, c'est-à-dire faisant l'objet d'un stockage dans la base de données, ont été représentées.

1.1.1.2. Réalisation « objet » avec le C++

Les données élémentaires ayant été répertoriées et analysées avec l'aide de la méthode OMT décrite ci-dessus, l'outil de programmation a permis de développer l'ensemble des codes de calcul. On a choisi le langage C++ (Microsoft Visual C++® version 4.0), langage « orienté objet », facilitant le développement des *classes* et des *méthodes* relatives aux différentes entités. Contrairement aux langages de développement « tout objet » (Smalltalk par exemple), le C++ permet une approche plus souple : il n'impose pas l'utilisation des classes mais la facilite. Dans le cadre d'un travail pour lequel nous recherchons un outil pratique, et où le purisme absolu du code n'est pas une fin en soi, nous percevons cette caractéristique comme un avantage. Par ailleurs, le langage C++, dérivé du langage C, a l'avantage de fournir un code assemblé extrêmement compact.

1.1.1.3. Implémentation relationnelle avec Microsoft Jet

Après le stade de conception, qui a inventorié les objets et leurs relations, la phase d'implémentation consiste à matérialiser ces éléments dans un système informatique, en l'occurrence un système de gestion de bases de données (SGBD).

La norme relationnelle [Codd, 1970, 1982 ; Date, 1981, 1986 ; Gardarin, 1987] est proposée par la grande majorité des SGBD actuels. Elle garantit notamment une intégrité maximale des données, et offre un standard en matière d'accès aux données : le langage SQL (Structured Query Language). Ce choix est un gage d'évolutivité car il permettra un passage éventuel à des SGBD plus puissants, donc capables de gérer un nombre plus important de données (Oracle®, Microsoft SQL Server® ou d'autres) avec un minimum d'adaptations.

Le SGBD choisi pour l'implémentation de notre modèle OBSIFRAC est le moteur Jet de Microsoft (version 3), utilisé par l'outil Microsoft Access version 7.0. Ce SGBD satisfait, en première approximation la norme relationnelle.

Le passage du niveau conceptuel au niveau physique de l'implémentation est réalisé par une traduction des concepts « objets » (classes, super-classes, associations, ...) vers les entités du langage relationnel (tables, clés primaires et étrangères,... voir ci-après).

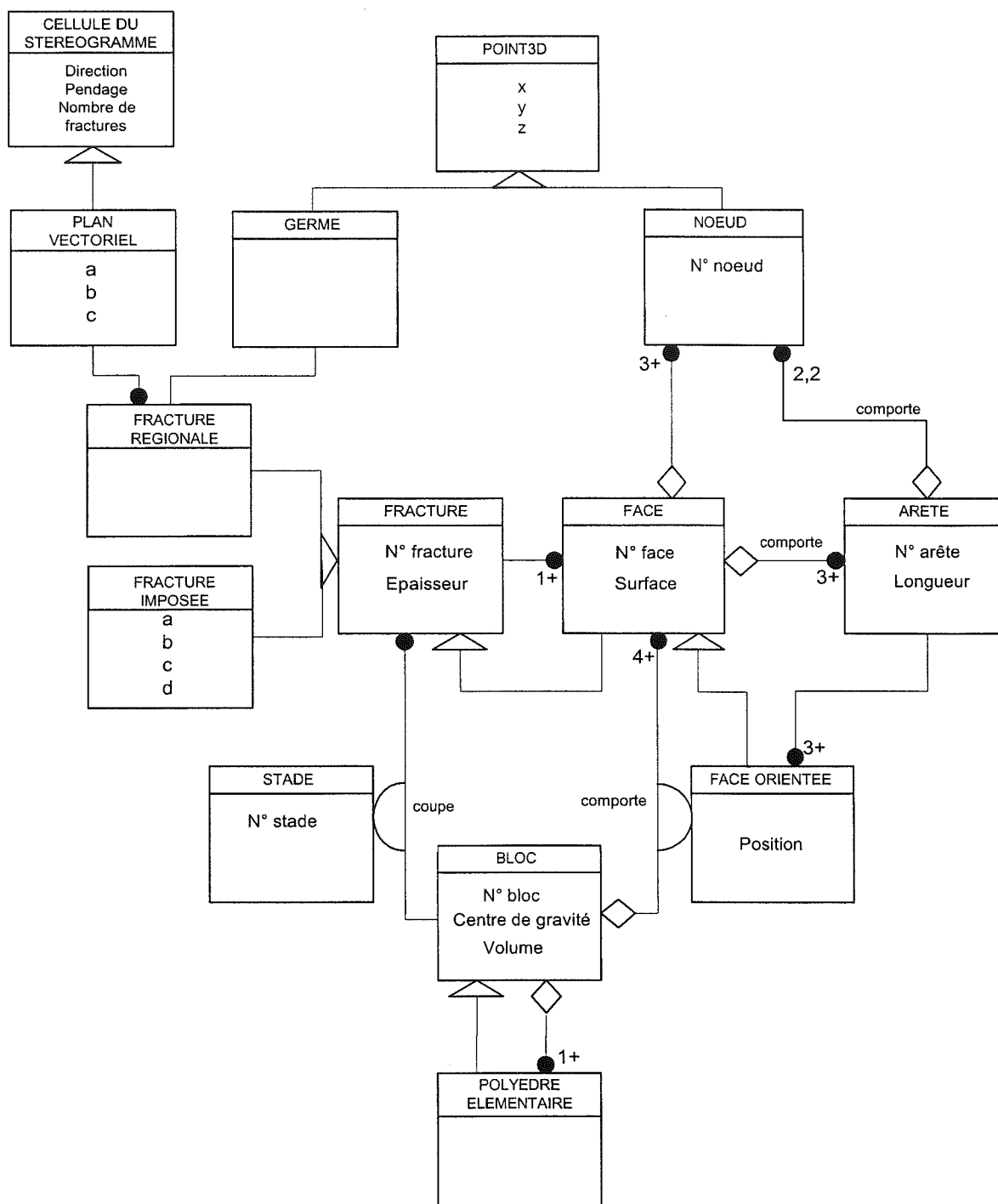


Fig. 42.- Conception du programme OBSIFRAC : Modèle statique objet selon la méthode OMT [Rumbaugh, 1995]. Ce schéma montre uniquement les classes persistantes du modèle, sous forme de rectangles. On y a fait figurer leurs attributs les plus significatifs. Les relations logiques entre classes sont représentées par un lien, portant à chaque extrémité un symbole indiquant la cardinalité de ce lien. Ainsi, l'absence de symbole signifie « une occurrence et une seule », tandis qu'un rond noir signifie « de 0 à n occurrences », la cardinalité minimum pouvant être précisée par un chiffre suivi du symbole +. A titre d'exemple : une fracture dite régionale (fracture non contrainte par sa position) naît d'un plan vectoriel unique et d'un germe unique ; un germe fait naître une fracture unique ; un plan vectoriel fait naître une fracture ou plusieurs. Certaines relations sont porteuses d'information : une fracture coupe un bloc à un stade d'avancement donné. L'information est portée par la classe Stade, qui est liée au lien Fracture-Bloc par un demi-cercle. De même, une face peut être orientée par rapport à un bloc (une face mitoyenne à deux blocs sera orientée inversement par rapport aux deux blocs) ; la classe Face Orientée est donc liée à la relation Bloc-Face. Les losanges désignent les agrégats : une face est composée de 3 noeuds ou plus ; une arête comporte 2 noeuds et 2 seulement. Les triangles aplatis indiquent un héritage (ou spécialisation) : Par exemple, un objet de la classe POINT3D (point dans l'espace) peut, éventuellement, être soit un « germe » pour une fracture, soit un noeud (ou sommet d'un bloc). Une fracture peut être « régionale » (issu de la combinaison d'un « germe » et d'un plan vectoriel), soit imposée sous la forme d'un plan affine, dont les paramètres de l'équation cartésienne sont a, b, c, d. La face hérite de la fracture certaines propriétés (numéro de la fracture, épaisseur, ...).

1.1.2. Les entités

Nous passerons en revue ici les différents objets (au sens commun du terme) modélisés dans OBSIFRAC (fig. 42).

1.1.2.1. Le « germe »

Les sciences des matériaux, la cristallographie nous apprennent que des défauts de structure à l'échelle moléculaire (dislocations) peuvent naître autour de zones ponctuelles, qui constituent des points de fragilité physique. A cette échelle, les impuretés chimiques peuvent occasionner des zones de plus faible cohésion du matériau, et favoriser la rupture.

A l'échelle macroscopique, la naissance d'une fracture intervient préférentiellement sur le tracé de fissures de rang inférieur (micro-fissures par exemple), et la notion de développement de fractures par nucléation est largement admise (voir par exemple Guegen et Palciauskas [1992]). Cette idée nous a fait envisager un point privilégié $G(x_0, y_0, z_0)$ de l'enceinte du modèle, comme le point de départ d'une fracture. Nous le nommerons « germe » dans la suite du travail.

Une différence importante existe entre les germes réels à partir desquels se développent les fractures dans le milieu naturel, et le germe tel qu'on l'entend dans le modèle. Le germe réel s'exprime à partir d'une discontinuité préexistante, qui prédétermine vraisemblablement dans une certaine mesure l'orientation de la future fracture. L'un des deux types de fractures que nous générons dans notre modèle (fractures « imposées ») respecte ce processus : un germe donné de l'espace impose une orientation de fracture. Au contraire, nous verrons que pour les fractures de type « régional » ou « périphérique » décrites ci-après, aucune information intrinsèque n'est portée par notre « germe » quant à l'orientation de la future fracture : l'attitude du plan de fracture résultant répond alors à une loi statistique.

A l'intérieur de l'enceinte du modèle, on définit une zone dite « de germination », dans laquelle les germes pourront prendre naissance. On peut ainsi observer la fracturation dans et hors de cette zone de germination.

1.1.2.2. La fracture et le bloc

L'enceinte du modèle, de forme parallélépipédique constitue le bloc primitif. Le découpage de ce bloc primitif par des fractures successives produira de nouveaux domaines polyédriques, ou blocs. Un bloc peut être simple (bloc *élémentaire*), ou au contraire composé lui-même de blocs élémentaires (bloc *complexe*).

La fracture est matérialisée par un plan affine dans l'espace R^3 , qui s'étend autour du germe (fig. 43).

La fracture s'applique exclusivement à un bloc. Ce choix sous-entend deux aspects importants :

1 - Elle peut découper aussi bien un bloc élémentaire qu'un bloc complexe, ce qui revient à dire qu'une fracture peut éventuellement recouper une ou plusieurs autres fractures ;

2 - Les limites de la fracture sont données par le bloc. Celui-ci étant polyédrique, la fracture est un polygone. Notons que cette définition de la fracture exclut le cas où une fracture se termine au sein du matériau (terminaison libre). Toute fracture prend donc fin soit sur une fracture préexistante, soit sur le bord du modèle.

Nous avons volontairement limité l'étude, dans le cadre de ce travail, aux blocs de forme convexes. La question s'est posée, en effet, de la population de blocs générés par le découpage d'un bloc complexe. Nous ne prenons pas en compte à ce stade les blocs de forme concave, faits de l'assemblage de polyèdres élémentaires convexes (fig. 44). Lorsqu'une fracture coupe un bloc complexe, les seuls nouveaux blocs générés sont les polyèdres élémentaires fils de chacun des blocs coupés.

Un lien de parenté est établi dans la base de données entre un bloc père et ses fils, permettant ainsi de garder l'historique du découpage.

Le modèle génère des fractures de deux types, correspondant à deux besoins différents du modèle :

- les fractures dites « régionales »
- les fractures dites « imposées »

Dans le cas des fractures « régionales », les valeurs d'orientation, qui déterminent l'attitude de la fracture un plan vectoriel, sont puisées dans une distribution statistique qui peut, par exemple, être représentative du contexte régional ou local de la fracturation.

Nous utilisons à cet effet comme source de fractures un tableau à double entrée que nous nommons « matrice régionale » par la suite. Le principe en sera détaillé ultérieurement. Dans un second temps, c'est le germe qui précise la position de la fracture.

Les fractures « imposées » correspondent à des fractures dont la position et l'orientation sont connues *a priori*. La notion de germe disparaît donc pour ce type de fracture.

La fracture modélisée possède une épaisseur. Cependant, ce paramètre n'a été prévu qu'en tant que propriété simple de la fracture, n'ayant aucune répercussion géométrique. Ce critère est prévu pour introduire la notion d'importance d'une fracture, en vue d'une discrimination entre fractures. L'épaisseur peut alors être liée à la surface, ou à la plus grande dimension, ou encore au nombre de blocs recoupés... Ce paramètre, bien que prévu dans le modèle, n'a pas fait l'objet d'une étude spécifique dans les exemples d'applications présentés.

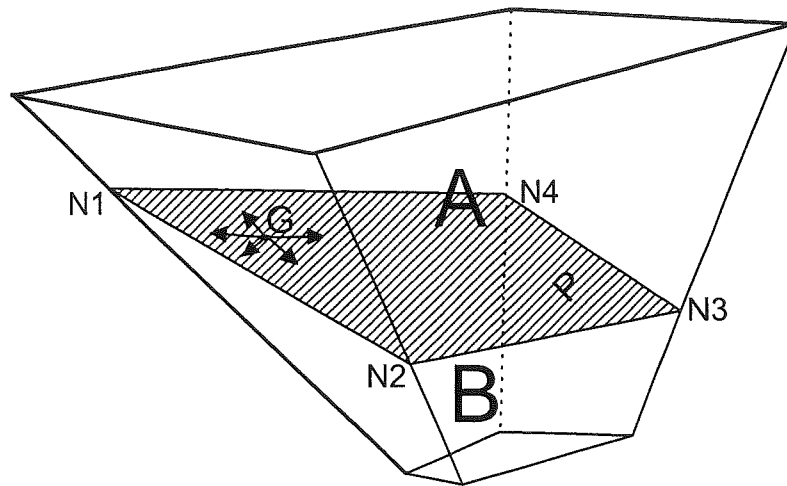


FIG. 43.- Schéma du découpage d'un bloc par une fracture. La fracture prend naissance autour d'un germe G, dans un plan P. Elle donne naissance à deux blocs fils A et B, qui ont une face commune (N1, N2, N3, N4) dans le plan de fracture.

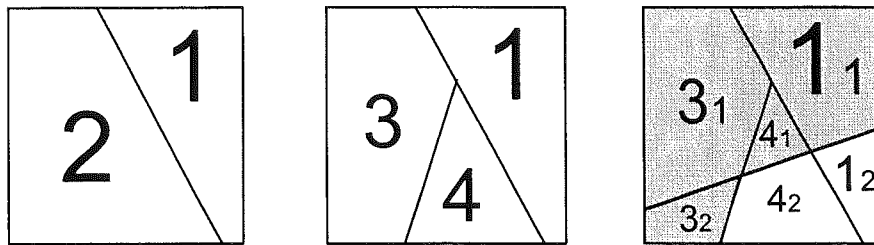


FIG. 44.- Blocs produits par le découpage d'un bloc complexe. Représentation schématique en deux dimensions. Le bloc initial (0) est découpé en 2 blocs, numérotés 1 et 2, par une première fracture ; puis le bloc 2 (*élémentaire*) est découpé en 2 blocs, 3 et 4 (2^{ème} fracture non recoupante); enfin, une troisième fracture recoupe les trois blocs 1, 3 et 4, et donc les fractures 1 et 2. Les seuls nouveaux blocs à inscrire dans la base de données à ce stade sont les blocs 11, 12, 31, 32, 41, et 42. Ainsi, par exemple, le bloc complexe formé des polyèdres élémentaires 31, 32, 41 et 11 (en gris) n'est pas mémorisé.

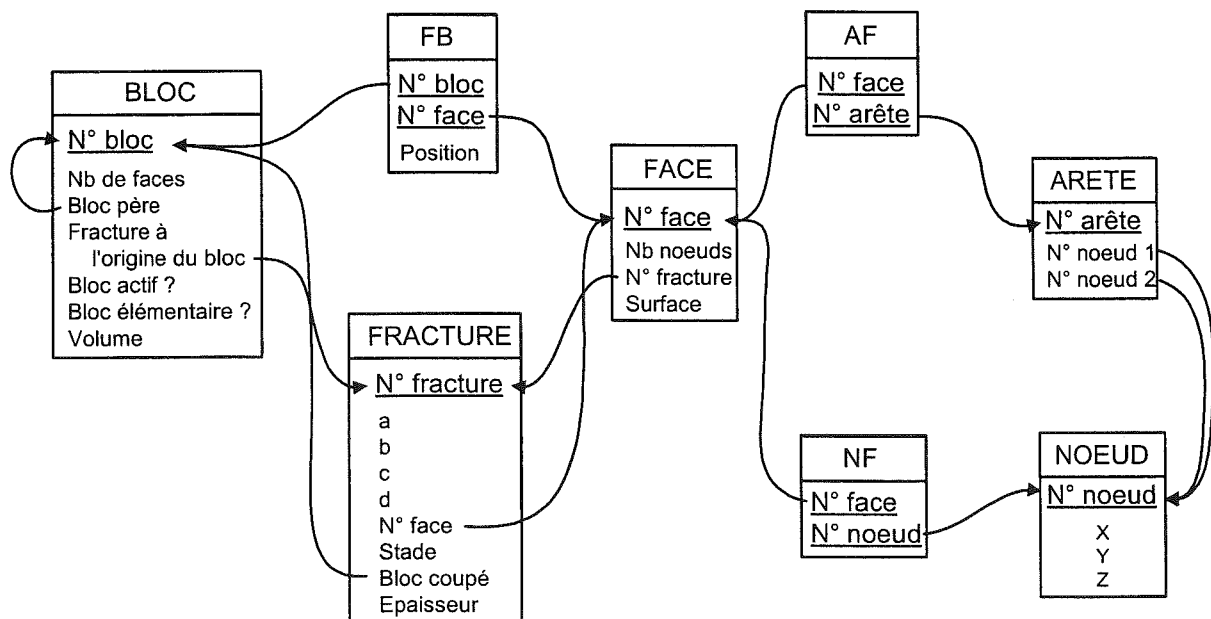


FIG. 45.- Implémentation de la base de données OBSIFRAC. Modèle relationnel. Les rectangles sont les tables, les attributs soulignés sont les clés primaires (ou identifiants uniques) de chaque table. Les flèches relient certains attributs (« clés étrangères ») aux clés primaires des tables référencées, en assurant ainsi l'intégrité référentielle de la base.

1.1.2.3. La face, l'arête, le noeud

Le polygone formé par une fracture coupant un bloc est une face, qui est commune aux deux blocs fils produits (fig. 44). Dans le cas où le bloc découpé est complexe, la face commune peut être composée d'un assemblage de polygones, qui sont eux-mêmes des faces de blocs élémentaires. Dans tous les cas, une face pointera sur la fracture qui l'a fait naître, une fracture pouvant être référencée sur plusieurs faces différentes coplanaires.

Une face est ainsi une liste ordonnée d'arêtes a_i : $(a_1, a_2, a_3, \dots, a_n)$, l'arête étant, elle, définie comme une paire de noeuds $\{N_1, N_2\}$ non ordonnés. La face commune aux blocs fils A et B (fig. 44) peut être représentée par la suite d'arêtes (a_1, a_2, a_3, a_4) ou encore par $(\{N_1, N_2\}, \{N_3, N_2\}, \{N_3, N_4\}, \{N_1, N_4\})$.

Il s'est avéré utile, dans un algorithme du modèle, d'orienter chaque face d'un même bloc de la même façon. L'objet « Face Orientée » du modèle statique a été créé à cet effet. Par convention, la liste des arêtes d'une face est parcourue dans le sens trigonométrique, lorsque cette face est vue de l'intérieur du bloc. Ainsi, dans le cas de la figure 44, le bloc A voit la face commune sous la forme (A_1, A_2, A_3, A_4) , tandis que le bloc B voit cette même face sous la forme (A_1, A_4, A_3, A_2) . Cependant, ces deux objets « Face Orientée » pointent dans la base de données vers un unique objet « Face ». On mémorise dans l'objet « Face Orientée » la position du plan de la face par rapport au centre de gravité du bloc (attribut Position). Par ailleurs, du point de vue de la métrique, la face possède une aire, une arête une longueur, et le bloc un volume.

1.1.2.4. Schéma relationnel de la base de données

Le respect de la norme relationnelle lors de l'implémentation a comme but essentiel la garantie de cohérence dans la base de données, par le jeu des contrôles d'intégrité référentielle. Par exemple :

- Un bloc naît d'une fracture et d'une seule (attribut *FracOrigine* de la table BLOC), fracture dont l'existence dans la table FRACTURE est nécessaire et vérifiée ;
- Ce bloc est issu de la division d'un bloc père (attribut *BlocPère* de la table BLOC), bloc dont l'existence dans la table BLOC est nécessaire et vérifiée (on pose comme convention que le bloc primitif a comme bloc père lui-même) ;
- Une fracture coupe un bloc et un seul (élémentaire ou complexe), existant dans la base (attribut *BlocCoupé* de la table FRACTURE) ;
- Une fracture correspond à une face d'un bloc, et cette face n'est issue que d'une seule fracture, l'existence de ces deux éléments étant assurée ;
- Une arête est constituée de noeuds existant nécessairement dans la base.

Par opposition à la représentation *conceptuelle* du

modèle statique de la méthode OMT (fig. 42), le schéma de la figure 45 présente de façon simplifiée l'organisation *physique* de la base de données, avec les tables et leurs relations.

1.2. La dynamique du modèle

Après avoir défini la notion de stade, nous examinerons ici les quatre parties de l'algorithme, dont la démarche générale est la suivante :

- 1/ Choix du type de fracture à réaliser
- 2/ Choix du bloc à diviser
- 3/ Choix du plan de fracture
- 4/ Division du bloc

Du point de vue du traitement informatique, l'accent a été mis, autant qu'il a été possible, sur l'indépendance vis-à-vis du système utilisé. Ainsi, on fait appel, pour l'accès aux bases de données à des requêtes en langage SQL (*Structured Query Language*, [Codd, 1972]), langage ensembliste, non procédural et normalisé des systèmes de gestion de bases de données relationnelles. On rend ainsi possible un futur changement de la base de données cible, tout en conservant toutes les requêtes SQL.

1.2.1. Notion de stade

Le stade est destiné à donner un numéro d'ordre au découpage élémentaire. Par découpage élémentaire, il faut entendre ici la rupture instantanée et indivisible d'un bloc, lui-même éventuellement composé de blocs (bloc complexe). Pour notre modèle, des fractures du même stade sont contemporaines. Cette notion de stade est propre à représenter la séquence de fragmentation (fig. 46).

1.2.2. Choix du type de fracture

La réalisation d'une fracture dans le modèle demande de choisir préalablement son type (« régionale » ou imposée, cf 1.1.2.2.). Chaque type de fracture possède son origine propre.

1.2.2.1. Source de fractures « régionales » : la matrice régionale

Alimentation de la matrice régionale

A partir d'un fichier de données (table FRACTURES REGIONALES de la base de données) donnant la direction de plongement a et le pendage b de chaque fracture, le programme offre la possibilité (facultative) de générer une table nommée STEREOGRAMME. Ceci est réalisé par l'algorithme de la façon suivante.

A partir de chaque fracture contenue dans la table FRACTURES REGIONALES, on calcule les coordonnées (x,y) du point P correspondant à la projection de Schmidt de la normale unitaire de la fracture. Cette projection (fig. 47) conserve les surfaces. Elle est donc adaptée pour construire une matrice bidimensionnelle de choix.

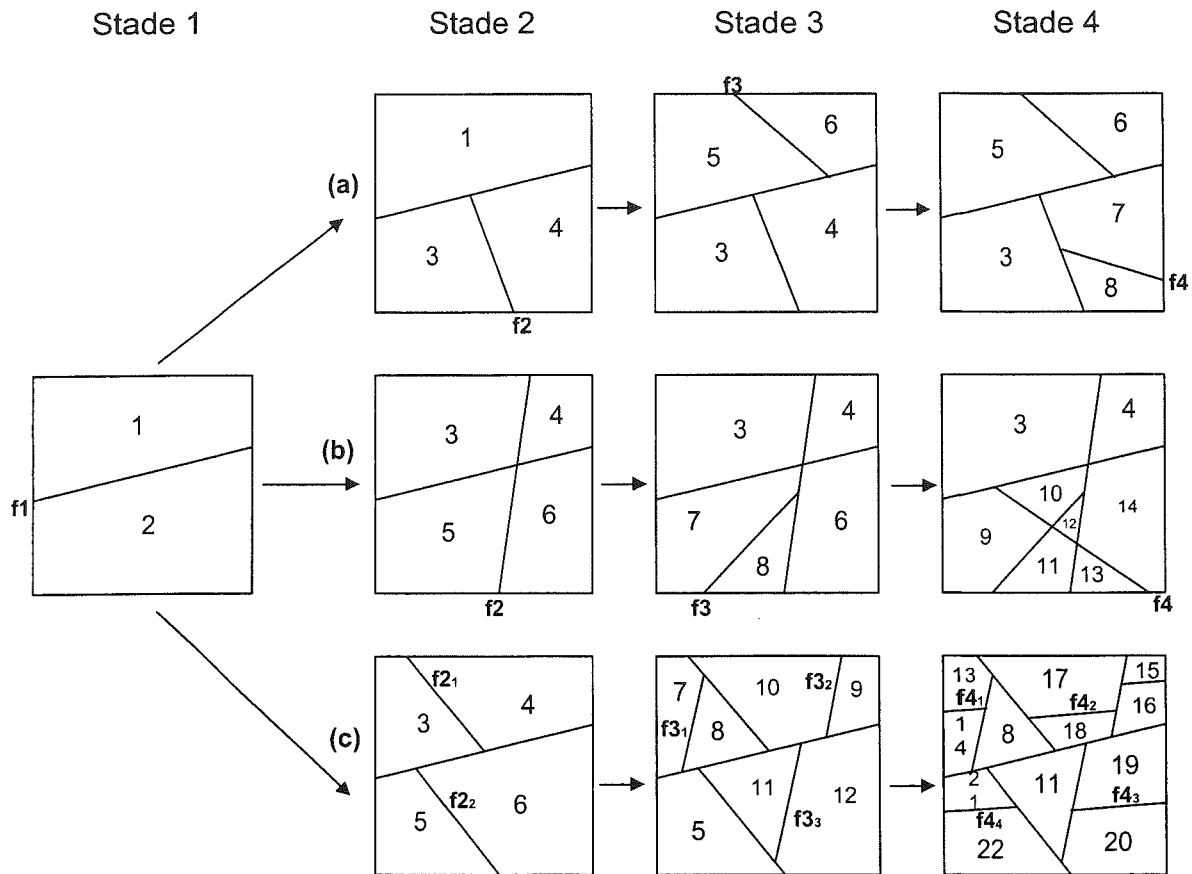


FIG. 46.– Illustration en 2D de la notion de stade. Sur cette figure, au stade 1, un bloc élémentaire primitif 0 est divisé par une fracture f_1 . Aux stades suivants, les trois scénarios suivants ont été distingués selon que l'on divise, à chaque stade, un seul bloc, toujours élémentaire (cas a), un seul bloc, éventuellement complexe (cas b), ou plusieurs blocs élémentaires (cas c). Dans le cas (a), les fractures f_2 , f_3 et f_4 coupent respectivement les blocs élémentaires 2, 1, et 4. Dans le cas (b), les fractures f_2 , f_3 et f_4 coupent respectivement les blocs 0 (complexe), 5 (élémentaire), et 2 (complexe). Dans le cas (c), au stade 2, les blocs 1 et 2 sont coupés respectivement par les fractures f_{21} et f_{22} . Au stade 3, les blocs 3, 4 et 6 sont divisés. Au stade 4, les blocs 5, 7, 9, 10, et 12 sont divisés. Pour ce cas (c), notons que l'orientation des fractures peut être constante pour un stade donné (c'est le cas ici), ou éventuellement différente. On peut ainsi faire apparaître la notion de famille de fractures (fractures contemporaines, d'orientations semblables).

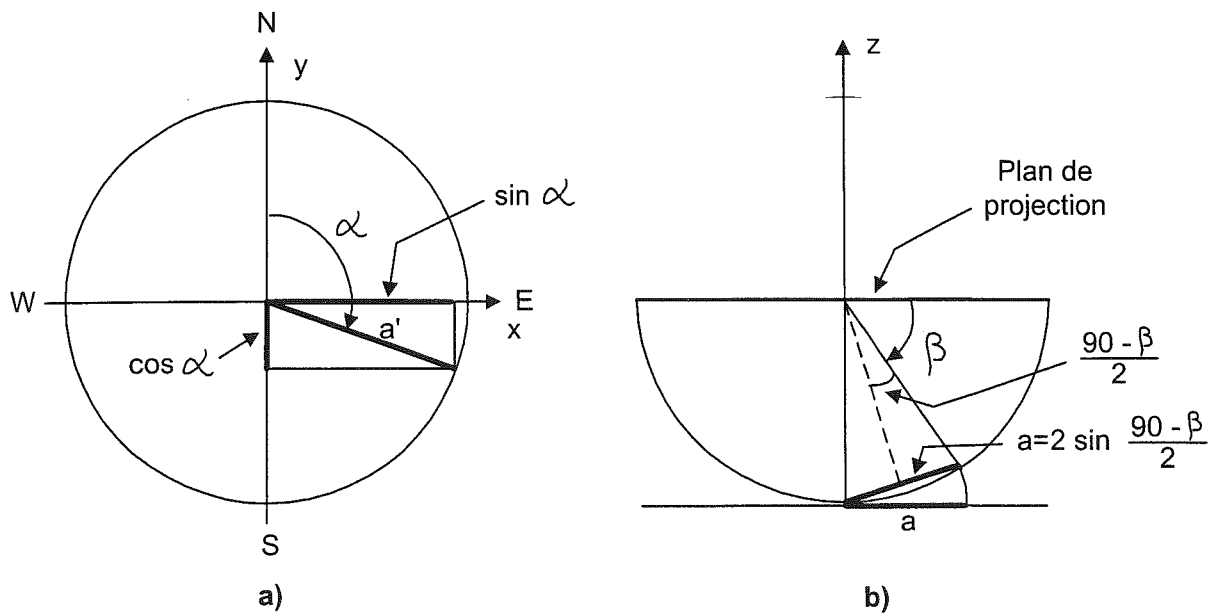


FIG. 47.– Principe de la projection de Schmidt. a) Vue en plan, b) Vue en coupe verticale. En b), on a : $a = 2 \sin((90-\beta)/2)$. Le module de projection $a' = k.a$ est à ramener sur un cercle de diamètre unité. On écrit cette condition pour $b=0$: $a' = 1 = k.a = k.2.\sin(45^\circ)$, ce qui donne $k = \sqrt{2}/2$, d'où finalement $a' = \sqrt{2} \sin((90-\beta)/2)$.

P(x,y) est tel que $-1 \leq x \leq 1$, et $-1 \leq y \leq 1$. On a, avec $\alpha \in]0, 360^\circ]$ et $\beta \in [0, 90^\circ]$:

$$\begin{cases} x = \sqrt{2} \sin \frac{90 - \beta}{2} \sin \alpha, \text{ et} \\ y = \sqrt{2} \sin \frac{90 - \beta}{2} \cos \alpha \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

On considère ensuite un maillage carré, comportant $M \times M$ cellules (pratiquement, nous considérerons des valeurs de M comprises entre 11 et 51), couvrant le domaine défini par :

$$\begin{cases} -1 \leq x \leq 1, \text{ et} \\ -1 \leq y \leq 1 \end{cases}$$

et que l'on superpose à l'ensemble des points P projetés.

Le tableau $M \times M$, que l'on a nommé « matrice régionale », est noté S par la suite. Le point P(x,y) obtenu par projection est affecté à une cellule S[i, j] de la matrice régionale, i et j étant tels que :

$$\begin{cases} i = \text{int}\left(\frac{x(M-1) + M}{2}\right) \\ j = \text{int}\left(\frac{-y(M-1) + M}{2}\right) \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

L'affectation du point P à la cellule S[i, j] de la matrice régionale est matérialisée par l'incrémementation de 1 du nombre $N_{i,j}$ contenu dans cette cellule.

La totalité des fractures contenues dans la table FRACTURES REGIONALES est lue de cette façon. La somme des $N_{i,j}$ de la matrice régionale est donc égale au nombre de fractures de la table FRACTURES REGIONALES.

D'un point de vue pratique, il est possible de conserver plusieurs matrices régionales relatives à des observations différentes et les réutiliser.

Tirage des fractures de la matrice régionale

La matrice régionale S étant constituée, le tirage d'une fracture est effectué pratiquement en tirant aléatoirement un couple de valeurs entières (i, j), dans l'intervalle [1, M]. Ces valeurs représentent les coordonnées (ligne, colonne) de la cellule C qui sera prise en compte dans la matrice régionale

A partir de ce couple de valeurs (i, j), on calcule les coordonnées (x, y) du centre de la cellule correspondante :

$$\begin{cases} x = \frac{2i}{M-1} - 1, & x \in [0, 1] \\ y = 1 - \frac{2j}{M-1}, & y \in [0, 1] \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

On trouve ensuite la direction de plongement a et le plongement b en inversant la formule (II.1).

Chaque cellule S[i, j] fournit ainsi un couple (orientation α , inclinaison β), et le nombre correspondant $N_{i,j}$ de fractures disponibles à réaliser.

Après le tirage d'une fracture, le nombre $N_{i,j}$ contenu dans la cellule C correspondante est décrémenté. Lorsque $N_{i,j}$ devient nul, il ne reste plus de fractures à tirer pour le couple (orientation, pendage) correspondant, et on réitère le tirage aléatoire de valeurs (i, j) jusqu'à trouver une cellule ayant un nombre $N_{i,j}$ de fractures strictement positif.

1.2.2.2. Source de fractures imposées : la table FRACTURES FORCEES

Pour définir complètement une fracture régionale, il faut préalablement définir son germe et son orientation. Dans les fractures imposées, ces deux qualificatifs sont déterminés *a priori*.

Le programme permet de reproduire des fractures dont la position est précisée par leurs coordonnées X, Y, Z (cas des observations de forages par exemple). A cet effet, la table FRACTURES FORCEES inventorie de façon individuelle les fractures qui devront être réalisées. On y indique, pour le point M(X, Y, Z) les valeurs en degrés de a, direction du plongement et b, plongement du plan de fracture. Les fractures sont dans un ordre quelconque. Comme dans le cas précédent, le triplet (X, Y, Z) représente le germe alors que le couple (direction de plongement, pendage) représente l'orientation. Une fracture imposée possède donc les mêmes paramètres qu'une fracture régionale. Seule diffère l'origine de ces paramètres. Il apparaît néanmoins fondamental de garder la mémoire de cette distinction.

Le bloc à couper étant identifié (cf *infra*), on procède au tirage aléatoire d'une fracture imposée dans cette table. Si la fracture coupe le bloc, la fracture imposée est marquée comme étant réalisée, de façon à ne plus être choisie ultérieurement. Si la fracture ne coupe pas le bloc, on renouvelle le tirage de fracture jusqu'à atteindre une des conditions suivantes :

- la fracture tirée permet de couper le bloc ;
- aucune des fractures forcées restantes ne permet de couper le bloc : dans ce cas, on réitère le tirage du bloc à couper.

1.2.2.3. Protocole de choix du type

Le choix entre une fracture de type « régional » et une fracture imposée est fait selon l'une des modalités suivantes :

- On peut réaliser *a priori* toutes les fractures imposées, ensuite seulement toutes les fractures régionales (mode « Initial ») ;

- On peut, au contraire construire les fractures imposées *a posteriori*, après toutes les fractures régionales (mode « Final ») ;

- Enfin, un scénario intermédiaire a été envisagé, celui où les fractures imposées sont distribuées de façon uniforme parmi les fractures régionales (mode « Réparti »).

La force de ce dispositif est la possibilité de reproduction des fractures observées. La mise en œuvre d'un protocole de choix plus élaboré que le mode « réparti » (permettant par exemple de situer individuellement une fracture forcée parmi les autres, régionales ou imposées) n'a pas été traitée, mais cette potentialité constitue un développement mineur que l'on peut facilement greffer au modèle OBSIFRAC.

1.2.3. Choix du bloc à couper

Le type de fracture étant choisi, l'algorithme recherche un bloc à diviser. Si les fractures recoupantes ont été autorisées dans le paramétrage de la simulation, le bloc pourra être éventuellement complexe. Dans le cas inverse, si le bloc est complexe, il sera abandonné et un nouveau choix sera opéré, de façon que le bloc retenu soit obligatoirement élémentaire. Notons qu'on utilise le générateur classique de nombres pseudo-aléatoires du langage C proposé dans l'outil Visual C++. La performance de ces générateurs, étant réputée satisfaisante par ailleurs, elle n'a pas fait l'objet d'une validation particulière pour l'étude.

Deux méthodes de choix du bloc sont distinguées :

- un choix aléatoire du bloc dans la table BLOCS,
- un choix aléatoire pondéré par le volume du bloc.

La raison d'être de la seconde méthode (pondération par le volume) est la recherche d'un algorithme rapide dans lequel la distribution des germes est équiprobable dans l'enceinte du modèle. Un tel algorithme aurait pu aussi être élaboré par le principe suivant :

- 1) choix d'un germe aléatoire dans le modèle,
- 2) choix des blocs contenant le germe,
- 3) choix d'un bloc parmi ceux-ci,
- 4) division du bloc choisi.

Or il s'avère que l'identification des blocs contenant un point donné (étape 2) est très coûteuse en temps de calcul. On a donc préféré à cet algorithme la séquence équivalente suivante :

- 1) choix aléatoire d'un bloc, en pondérant ce choix par le volume du bloc,
- 2) choix d'un germe à l'intérieur du bloc choisi,
- 3) division du bloc choisi.

La mise en œuvre pratique est présentée ci-après (fig. 48).

L'étape suivante dans l'algorithme de découpage est la construction de la fracture.

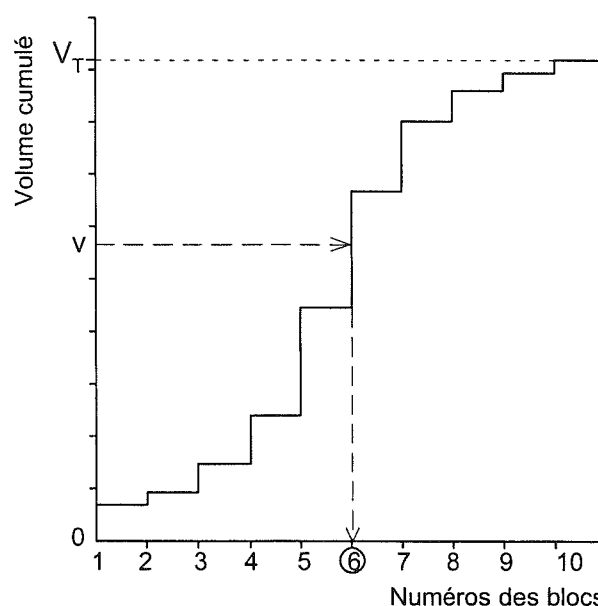


Fig. 48.- Principe de choix aléatoire d'un bloc pondéré par son volume. 1) On identifie le sous-ensemble des blocs du modèle qui sont candidats (suivant que les fractures sont éventuellement recoupantes ou non, il s'agit de tous les blocs du modèle, ou seulement des blocs élémentaires). La somme des volumes de ces blocs est V_T . 2) On construit la distribution cumulée des volumes des blocs concernés. 3) On choisit de façon aléatoire une valeur v telle que $0 \leq v \leq V_T$. 4) La valeur correspondante de l'abscisse désigne le bloc retenu.

1.2.4. Construction élémentaire d'une fracture

1.2.4.1. Caractérisation d'un bloc en demi-espaces [Goodman et Shi, 1985]

Considérons un plan de fracture P_i , donné par son équation cartésienne $a_i x + b_i y + c_i z + d_i = 0$. Ce plan découpe l'espace E en deux demi-espaces, que l'on notera P_i et N_i . P_i , demi-espace positif, est l'ensemble des points tels que $a_i x + b_i y + c_i z + d_i > 0$ et N_i , demi-espace négatif, est l'ensemble des points tels que $a_i x + b_i y + c_i z + d_i < 0$.

Un bloc est l'intersection d'un nombre fini de demi-espaces (fig. 49). Il est possible alors de représenter la « position en demi-espaces » Π du bloc, sous la forme :

$$\Pi = X_1 X_2 X_3 X_4 \dots X_n, \text{ où } X_i \text{ vaut}$$

$$\begin{aligned} &N_i \text{ si tout point du bloc } M(x, y, z) \\ &\text{satisfait } a_i x + b_i y + c_i z + d_i < 0 \\ &P_i \text{ si tout point du bloc } M(x, y, z) \\ &\text{satisfait } a_i x + b_i y + c_i z + d_i > 0 \end{aligned} \quad (\text{II.4})$$

Pratiquement, la position en demi-espaces d'un bloc donné est calculée à l'aide des coordonnées du centre de gravité C du bloc : $C(x_C, y_C, z_C)$, en examinant le signe de l'expression $a_i x + b_i y + c_i z + d_i$ pour chaque plan P_i limitant le bloc. Cette information est mémorisée

dans la table FB (champ POSITION). Pour un couple unique (bloc, face), on conserve ainsi la position de la face par rapport au bloc.

1.2.4.2. Choix du germe

Dans un premier temps, on effectue le tirage d'un point à l'intérieur du bloc retenu. Pour ce faire, on considère l'enveloppe sphérique centrée sur le barycentre du bloc. Cette enveloppe a un rayon r correspondant à la distance maximale barycentre/sommets du bloc. On tire un point G dans cette enveloppe par l'intermédiaire de ses coordonnées sphériques :

$$G(\rho, \theta, \varphi), \quad (II.5)$$

où $0 \leq \theta < 2\pi$, $0 \leq \varphi < 2\pi$, $0 \leq \rho < r$

On teste ensuite si le point G est effectivement à l'intérieur du bloc. Le processus de tirage du germe est réitéré tant que le point est hors du bloc.

Bien qu'il ait été possible de formuler une condition analytique de l'appartenance du point au bloc, cette technique, assez lourde par ailleurs, n'a pas été retenue. On lui a préféré la méthode des demi-espaces décrite ci-dessus. Le bloc est préalablement caractérisé par sa position en demi-espaces Π . Puis on examine de la même façon la position relative du germe candidat G par rapport aux plans limitant le bloc, et on établit ainsi la « position en demi-espaces » Π' du point G . Une condition nécessaire et suffisante pour que le point G soit à l'intérieur du bloc est alors que les positions en demi-espaces soient égales : $\Pi = \Pi'$.

1.2.4.3. Définition complète du plan de fracture

Le germe G étant choisi, on procède au choix d'une orientation de plan de fracture. Ceci est réalisé par tirage aléatoire d'un couple d'entiers qui se rapportent aux indices de la « matrice régionale » S (cf. 1.2.2.1.). Si le nombre N de fractures restant disponibles en $S[i, j]$ est non nul, on retient comme orientation les valeurs α et β correspondant respectivement à la direction de plongement et au plongement de la fracture. Trois paramètres (a, b, c) caractéristiques du plan de fracture sont alors calculés :

$$\begin{cases} a = \sin\alpha \cdot \cos\beta \\ b = \cos\alpha \cdot \cos\beta \\ c = -\sin\beta \end{cases} \quad (II.6)$$

Ces 3 paramètres sont les cosinus directeurs qui permettent facilement une écriture de l'équation vérifiée par l'ensemble des points de la fracture :

$$a.x + b.y + c.z = d, \quad (II.7)$$

d désignant la distance du plan par rapport à l'origine. d est déterminé lorsqu'on se fixe un point de la fracture (germe).

Pour obtenir l'équation cartésienne complète du plan de fracture, on utilise le triplet (x_G, y_G, z_G) correspondant à la position des germes. On traduit le fait que le plan passe par le germe G , et on calcule d :

$$d = -(a.x_G + b.y_G + c.z_G) \quad (II.8)$$

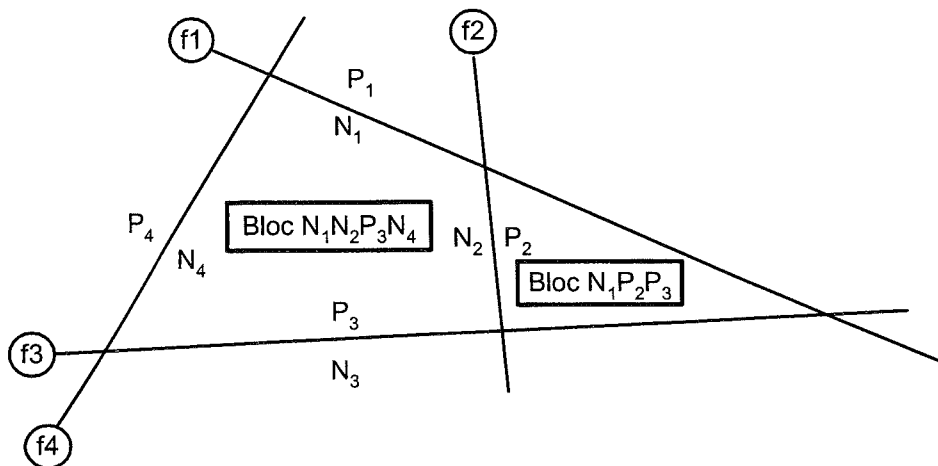


FIG. 49.— Illustration en deux dimensions de la caractérisation d'un bloc en demi-espaces. Les fractures f1, f2, f3 et f4 délimitent deux blocs qui sont l'intersection de demi-espaces.

1.2.5. Division du bloc

1.2.5.1. Lecture du bloc et de ses composants

Cette partie de l'algorithme impose que le bloc soit parfaitement décrit dans la base de données en termes de faces, arêtes, noeuds. Ces éléments descriptifs sont lus en mémoire, pour le bloc choisi uniquement. Informatiquement, ce mode de fonctionnement assure une consommation minimale de ressources, en minimisant l'occupation mémoire. Le processus de découpage élémentaire utilise ainsi une quantité de mémoire quasiment constante au cours du temps. Cette remarque est importante du point de vue technique : en termes de nombre de fractures générées et de nombre de blocs divisés, le traitement ne dépend que de la capacité du gestionnaire de bases de données (SGBD). Le processus n'a donc pas de facteur limitant intrinsèque, et le choix d'un SGBD plus puissant permet de repousser facilement les limites du découpage.

Dans le cas du choix d'un bloc complexe, on lit, et on découpe un par un tous les blocs constitutifs élémentaires effectivement recoupés par la fracture.

1.2.5.2. Processus de division

- Blocs élémentaires

Dans le cas d'un bloc élémentaire, on parcourt une à une les faces du bloc, et on examine leur intersection avec le plan de fracture.

Pour chaque face F,

- si elle n'est pas intersectée, elle est attribuée à l'un des 2 blocs fils,
- si elle est intersectée, elle donne naissance à 2 faces « filles », rapportées chacune à un bloc fils, et la trace de la fracture est une arête de la future face commune aux 2 blocs fils, face que l'on constitue ainsi au fur et à mesure.

Lorsque toutes les faces ont été examinées, la face commune est rapportée à chacun des 2 blocs fils. Cette information est mémorisée dans la table FB.

- Blocs complexes

Le découpage d'un bloc complexe est fait en deux temps :

1) *Identification des polyèdres élémentaires constitutifs du bloc complexe.*

L'algorithme d'identification des polyèdres élémentaires d'un bloc B donné est représenté sur la figure 50 :

2) *Division de certains de ces polyèdres.*

Les polyèdres élémentaires du bloc complexe étant identifiés, le programme examine l'intersection de chacun d'entre eux avec le plan de fracture. Une condition nécessaire et suffisante pour que le plan coupe le polyèdre, est qu'il existe au moins deux noeuds du polyèdre de part et d'autre de ce plan. Les polyèdres concernés sont ensuite divisés comme il est décrit plus haut.

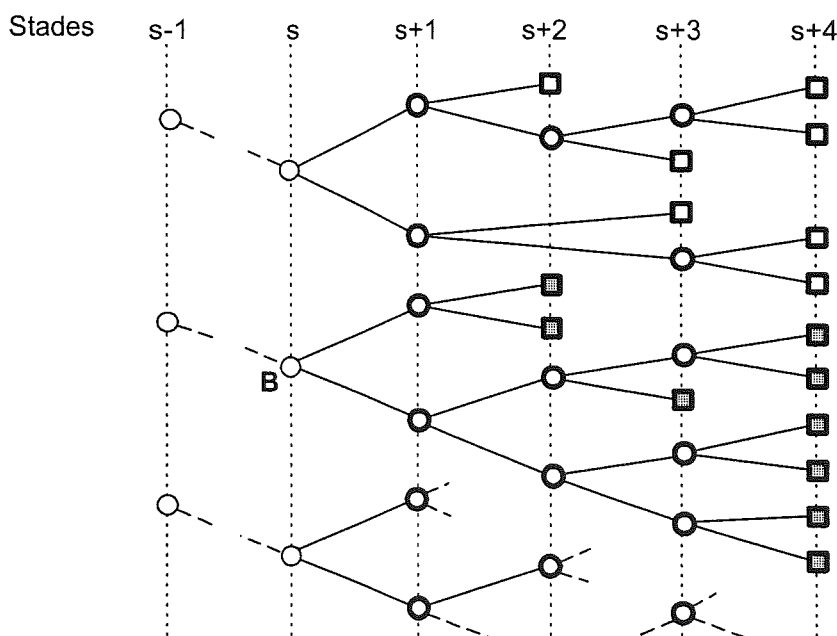


FIG. 50.- Arborescence de découpage de blocs. Illustration de l'algorithme de recherche des blocs élémentaires constituant un bloc donné B. Les polyèdres élémentaires sont représentés par des carrés, les blocs complexes par des cercles. En trait gras : les blocs testés. En gris : les polyèdres élémentaires du bloc complexe B. Dans l'exemple choisi, le bloc B a été généré au stade s. On constitue le sous-ensemble E des blocs de stade strictement supérieur à s. Les blocs correspondants sont figurés en trait gras sur la figure. Dans ce sous-ensemble E, on parcourt un à un les blocs élémentaires (carrés sur la figure). Pour chacun de ces blocs élémentaires, on cherche, toujours dans E, l'ancêtre le plus ancien. Si cet ancêtre est B, le bloc élémentaire est retenu et mémorisé (grisés sur la figure).

La figure 51 illustre le découpage d'un bloc complexe. Cet algorithme est rapide et permet de ne pas mémoriser, pour chaque bloc, toute la liste de ses ancêtres. L'information nécessaire et suffisante est portée par le champ BLOCPERE de la table BLOC.

2.- EXPLORATION THÉORIQUE DU MODÈLE

Le modèle ainsi élaboré est destiné à nous permettre de comprendre les mécanismes complexes de la

fracturation. Cette approche permet en effet d'identifier des phénomènes comme étant à l'origine des distributions observées sur le terrain. Plus précisément, on pourrait attendre de notre modèle qu'il révèle un lien entre les lois de distribution statistique observées *in situ*, pour différentes variables (longueurs des traces de fractures dans un plan (2D), distances entre fractures dans un puits (1D) par exemple) et les modalités géométriques du mécanisme de fracturation. L'expression « modalités géométriques » recouvre évidemment un ensemble vaste de schémas différents, impliquant un grand nombre de variables plus ou moins indépendantes. On a donc tenté de qualifier ou quantifier

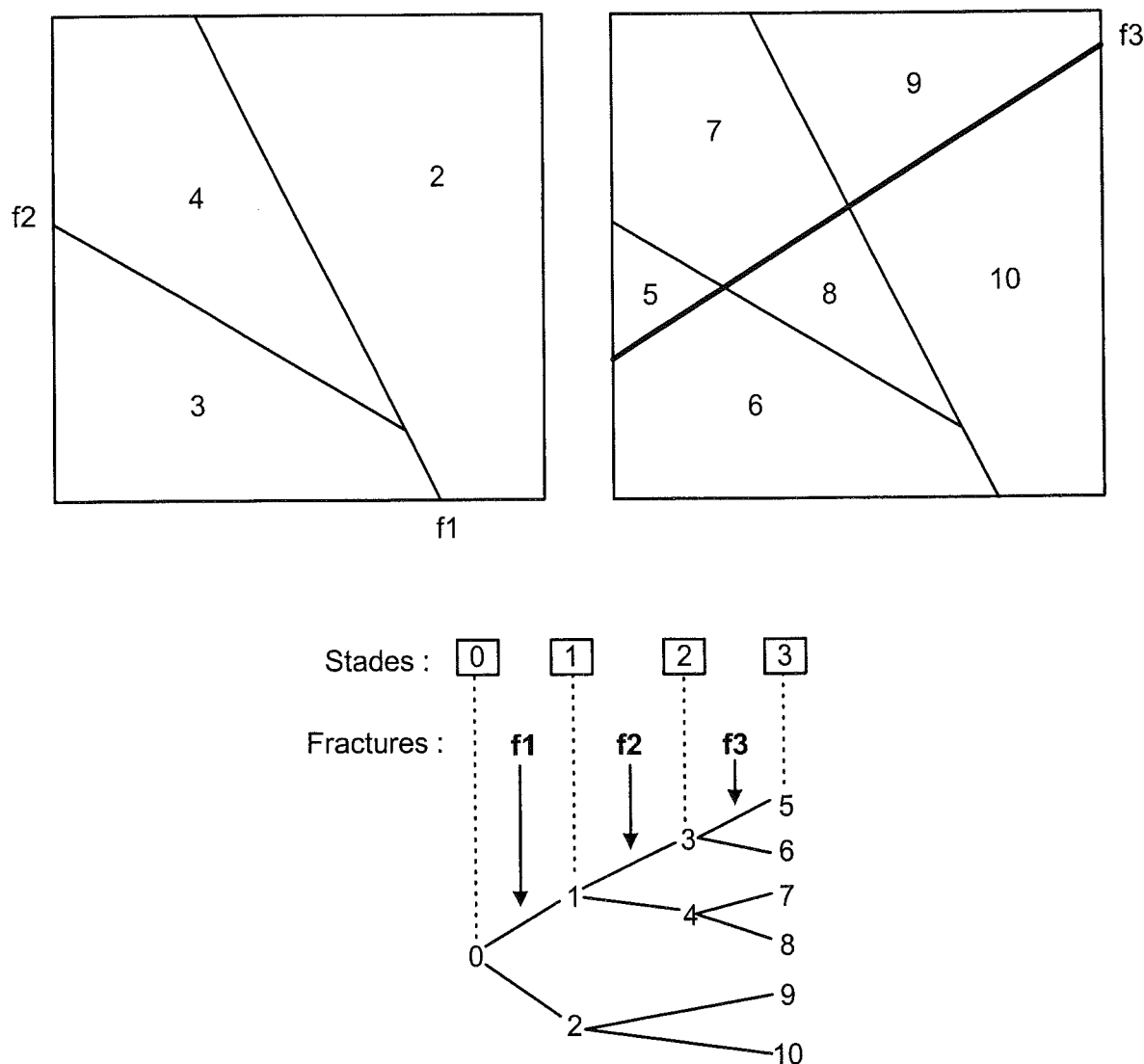


FIG. 51.- Exemple de découpage d'un bloc complexe. Le bloc primitif 0 (élémentaire, stade 0) est divisé par la fracture f1 ce qui donne les blocs 1 et 2, qui apparaissent au stade 1. Puis la fracture f2 divise le bloc 1 (élémentaire) en 3 et 4 (stade 2). Enfin, le bloc complexe 0 est divisé par la fracture f3. Cette fracture affecte les blocs élémentaires 2, 3 et 4, et génère les blocs élémentaires 5 à 10 au stade 3. Dans la base de données, on mémorise les éléments suivants après le découpage du bloc 0 par la fracture f3 :

- le bloc père de 5 et 6 est le bloc 3 ; le bloc père de 7 et 8 est 4 ; le père de 9 et 10 est 2 ;
- les blocs 5 à 10 sont élémentaires ; 3, 4 et 2 ne le sont plus.
- la fracture à l'origine des blocs 5 à 10 est f3, donnée par son équation cartésienne. Elle a coupé le bloc 0 au stade 3. Ce bloc 0 était complexe.
- le volume des blocs 5 à 10 est calculé et mémorisé.

le rôle de quelques-unes de ces variables ou processus élémentaires à travers l'examen de la géométrie de réseaux simulés.

Nous exposons ci-dessous les limites de cette première étude.

2.1. Paramètres retenus

Toutes les simulations présentées dans cette partie ont été réalisées dans l'enceinte d'un modèle cubique de dimension arbitraire. Cette absence de dimension permet d'examiner le comportement des processus sur une large gamme d'échelles. Cette gamme d'échelles ne sera limitée que par la résolution du module de calcul des programmes de simulation d'une part, et la dimension du modèle d'autre part.

Les tests que nous avons effectués ont été arrêtés à un nombre maximum de 150 000 fractures. Cette valeur est arbitraire. Une extension à un nombre supérieur de fractures est envisageable, les facteurs limitants étant alors le temps de calcul et la capacité du système de gestion de bases de données.

2.1.1. Processus de découpage

Notre hypothèse de départ a été la suivante :

Peut-on relier de façon simple la dynamique du découpage d'un bloc rocheux et les lois de distribution des traces de fractures obtenues en coupe ou en forage ? Cette question nous a amené à étudier l'influence de divers protocoles ou scénarios de division des blocs.

Pour cet exemple d'application, nous admettrons la génération de plans de fractures coupant un seul bloc élémentaire, c'est-à-dire ne recoupant pas d'autres fractures. En outre, nous n'étudierons pas l'orientation des plans de fractures en tant que paramètre ; ainsi leur azimut et inclinaison seront présumés aléatoires. Par ailleurs, on imagine que la rupture, phénomène instantané, est initiée sur un « germe », ce germe donnant lieu à une fracture unique du bloc le contenant. L'utilisation de cette notion a été justifiée plus haut (cf supra). La répartition des germes permet ainsi de contrôler la distribution des fractures. Dès lors, on peut envisager deux cas de figures simples.

Le premier cas est celui où les germes sont dispersés aléatoirement et uniformément sur l'ensemble du domaine d'étude. Ce cas de figure pourrait exprimer, du point de vue de sa signification physique, une certaine isotropie du domaine en termes de compétence à la rupture, sans lien avec la notion de bloc. Les simulations correspondantes seront nommées simulations de *type B* dans la suite du propos.

Le second cas concerne la répartition aléatoire des germes dans certains blocs préexistants, préalablement choisis par un processus stochastique (simulations de

type A) ou statistique (simulations de *types C et D*). On peut ainsi, par exemple, exprimer la notion de probabilité constante de rupture d'un bloc quelconque du modèle. Un enjeu fondamental d'une approche statistique est la compréhension des lois de la fragmentation d'une roche (voir Première Partie).

Considérons le modèle à un stade i de son évolution. Il est alors constitué de N_i blocs élémentaires.

2.1.1.1. Scénario de type B : Germe aléatoire dans le modèle

On choisit un germe dont la position est aléatoire dans l'enceinte du modèle. On divise alors le bloc de volume minimal contenant ce point. On obtient ainsi la fracture de stade $i+1$. On réitère le procédé, en générant ainsi une fracture à chaque stade. L'algorithme de recherche du bloc minimal contenant le germe étant assez lourd, on lui a préféré l'algorithme présenté au § 1.2.3. Statistiquement, la probabilité de fracturation d'un bloc est variable. Elle dépend du volume de ce bloc et vaut, pour le bloc j de volume V_j inclus dans un volume total du modèle V_T (fig. 52) :

$$p(j) = \frac{V_j}{V_T} \quad (\text{II.9})$$

Cette probabilité est constante au cours du processus, jusqu'à ce que le bloc se fragmente.

2.1.1.2. Scénario de type A : Germe aléatoire dans un bloc aléatoire

On choisit aléatoirement un bloc parmi l'ensemble des blocs élémentaires du domaine considéré. On choisit ensuite aléatoirement un point à l'intérieur de ce bloc. Toutes les positions sont équiprobables. On étend à partir de ce point une fracture qui divise le bloc. On obtient ainsi la fracture de stade $i+1$. On réitère le procédé, en générant ainsi une fracture à chaque stade.

Les deux scénarios A et B diffèrent par la procédure de choix du germe, donc de position du bloc à couper. Statistiquement, la probabilité de fracturation d'un bloc est dans ce cas :

$$p = \frac{1}{i+1}, \quad (\text{II.10})$$

car $i+1$ est le nombre de blocs au stade i

Elle n'est pas constante au cours du processus : elle diminue progressivement à chaque stade. La figure 52 schématise ce processus.

Dans ces deux cas, le processus géométrique ne préjuge qu'en partie seulement de la chronologie d'apparition des fractures dans le processus naturel. En effet, la fracture apparaissant au stade 6 et divisant le bloc 6 en 11 et 12 (fig. 52) peut très bien être contemporaine de la fracture divisant le bloc 4 au stade

5 et donnant les blocs fils 9 et 10. Pour des raisons d'algorithme de calcul, il est apparu nécessaire de distinguer des stades, distinction technique, qui n'empêche pas des fractures situées sur des ramifications différentes, voire très lointaines de l'arbre d'être, dans la réalité, contemporaines.

2.1.1.3. Scénario de type C : Salves sans remise

Ce type de scénario est inspiré des modèles de fragmentation présentés par Allègre [1982] et Turcotte [1986, 1997], qui ont été expliqués de façon détaillée dans la première partie de notre travail. On effectue une division simultanée de plusieurs blocs. Chaque bloc élémentaire a la même probabilité p d'être divisé. Cette probabilité est constante lors de l'évolution du modèle,

c'est-à-dire quel que soit le stade i . Parmi les N_i blocs produits au stade i , ($N_i = N_0 \cdot (2p)^i$) on choisit donc $N_i \cdot p$ blocs ($N_i \cdot p = N_0 \cdot p \cdot (2p)^i$), qui sont divisés pour générer $2 \cdot N_i \cdot p = N_0 \cdot (2p)^{i+1}$ blocs nouveaux au stade $i+1$. Les $N_i \cdot (1-p)$ blocs restants non fracturés sont définitivement exclus du processus et ne pourront plus être fracturés (tirages sans remise) (fig. 53).

Le nombre total de blocs élémentaires au stade i est donc :

$$N_T = N_0 \cdot (1-p) \cdot [1 + 2p + (2p)^2 + \dots + (2p)^i] \quad (\text{II.11})$$

Après n divisions, on obtient $N_0 \cdot (2p)^{n-1} \cdot (p+1)$ blocs élémentaires. Un exemple de simulation de ce type est donné par la figure 54.

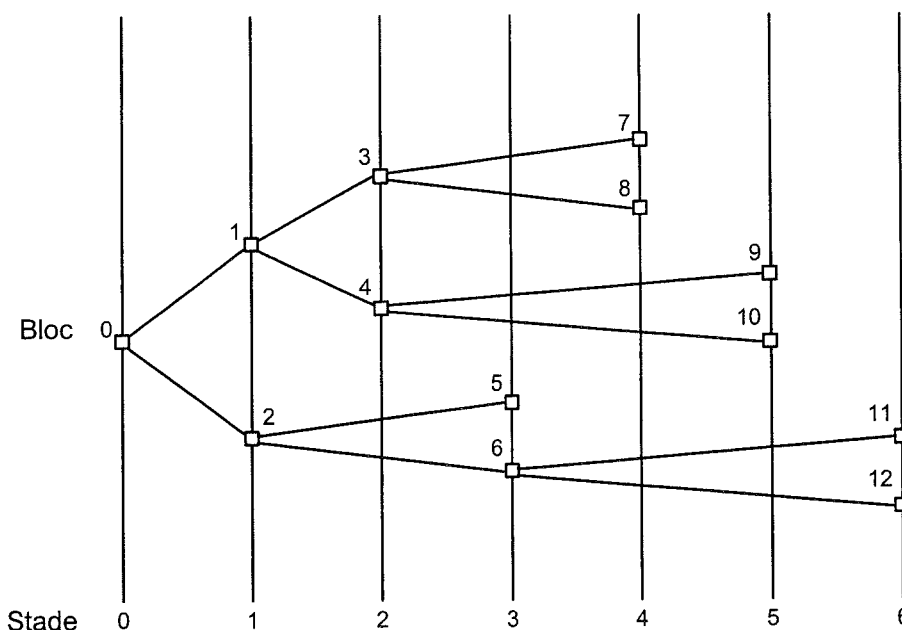


FIG. 52.- Exemple de découpage des blocs dans les cas A et B. Le bloc 0 donne au stade 1 les blocs 1 et 2 ; le bloc 1 est divisé au stade 2 et donne les blocs 3 et 4. Le bloc 2 est divisé au stade 3 et engendre les blocs 5 et 6, etc... Un bloc unique est divisé à chaque stade i , avec, dans le scénario A, une probabilité $p=1/N_i$, où N_i est le nombre de blocs au stade $i+1$.

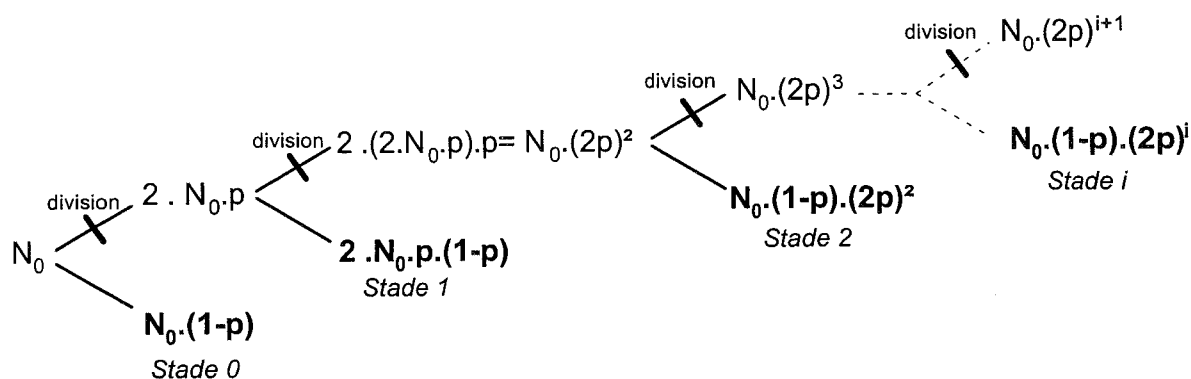


FIG. 53.- Schéma de principe du processus de découpage de type C, indiquant le nombre de blocs générés. Au stade 0, on a N_0 blocs, parmi lesquels $N_0 \cdot p$ sont choisis pour division (donnant $2 \cdot N_0 \cdot p$ blocs nouveaux), et $N_0 \cdot (1-p)$ sont désactivés, c'est-à-dire sortis du processus. Au stade i , on génère ainsi $N_0 \cdot (1-p) \cdot (2p)^i$ blocs nouveaux.

Dans ce processus, contrairement aux hypothèses utilisées dans les modèles de Turcotte [1986, 1997] et Allègre [1982], le volume des blocs fils n'est pas une fraction constante du volume du bloc père. La répartition des volumes entre les deux blocs fils n'est pas constante au cours du processus, mais elle dépend de la position du germe et de l'orientation de la fracture choisie.

2.1.1.4. Scénario de type D : Salves avec remise

Par différence avec le scénario de type C, dans ce processus, les $N_i(1-p)$ blocs restants non fracturés au stade i sont remis en jeu au stade suivant, et pourront être divisés lors d'une phase ultérieure (tirages des blocs avec remise en jeu, ou bernoulliens) (fig. 55).

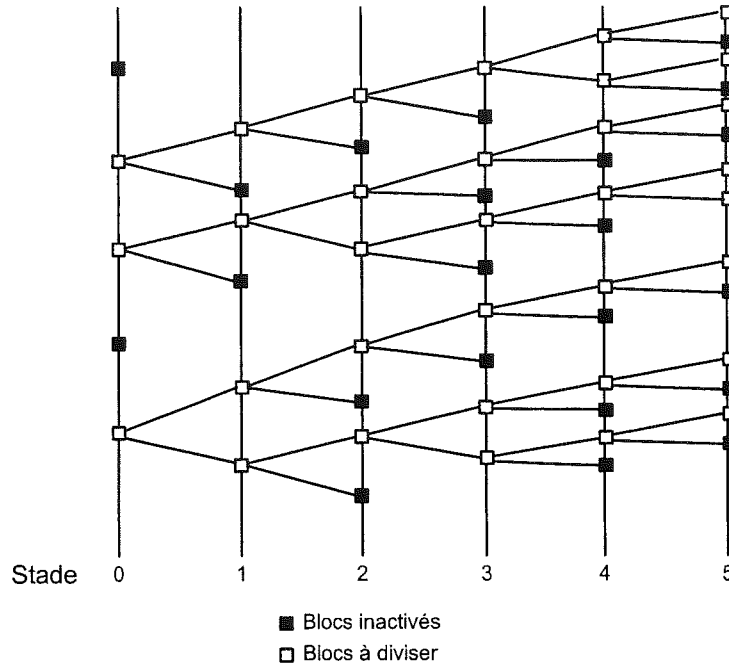


FIG. 54.— Exemple de découpage des blocs dans le scénario C, dans le cas où le nombre initial de blocs est $N_0=5$, et la probabilité qu'un bloc quelconque soit fragile est $p=3/5$. A chaque stade i , on désactive définitivement $N_i(1-p)$ blocs (en noir), et on divise $N_i p$ blocs (en blanc). Le nombre de blocs à diviser à chaque stade est arrondi à l'unité la plus proche.

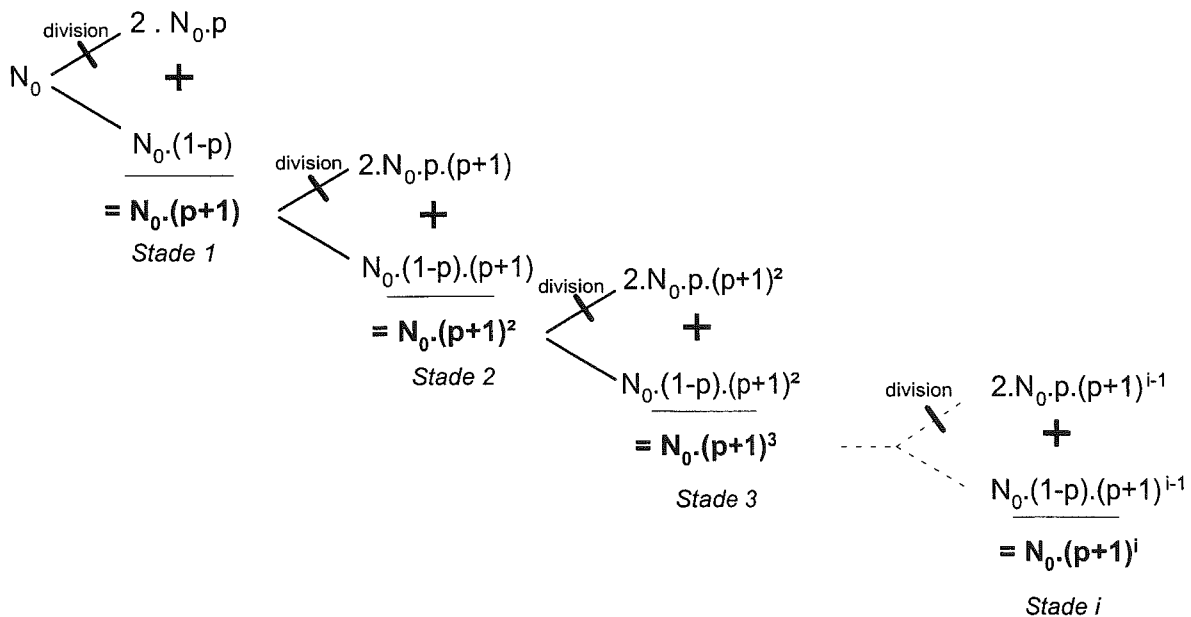


FIG. 55.— Schéma de principe du processus de découpage de type D, indiquant le nombre de blocs générés. Au stade 0, on a N_0 blocs, parmi lesquels $N_0 p$ sont choisis pour division (donnant $2 \cdot N_0 \cdot p$ nouveaux blocs), et $N_0(1-p)$ blocs restent non divisés. Au stade 1, les $2 \cdot N_0 \cdot p$ nouveaux blocs, ainsi que les $N_0(1-p)$ blocs non divisés participent au tirage. Au stade i , on effectue donc le tirage parmi $N_0(p+1)^i$ blocs.

Une illustration du principe est donnée par les figures 55 et 56.

Après n divisions, on obtient $N_0 \cdot (p+1)^{n-1}$ blocs élémentaires. Par comparaison avec le scénario C, le nombre de blocs est supérieur, dans un rapport :

$$r = \left(\frac{p+1}{2p} \right)^{n-1} \quad (\text{II.12})$$

On note que pour un stade i , une seule fracture est générée dans les scénarios de type A et B, alors qu'on construit une salve de $N_i \cdot p$ fractures pour les scénarios C et D.

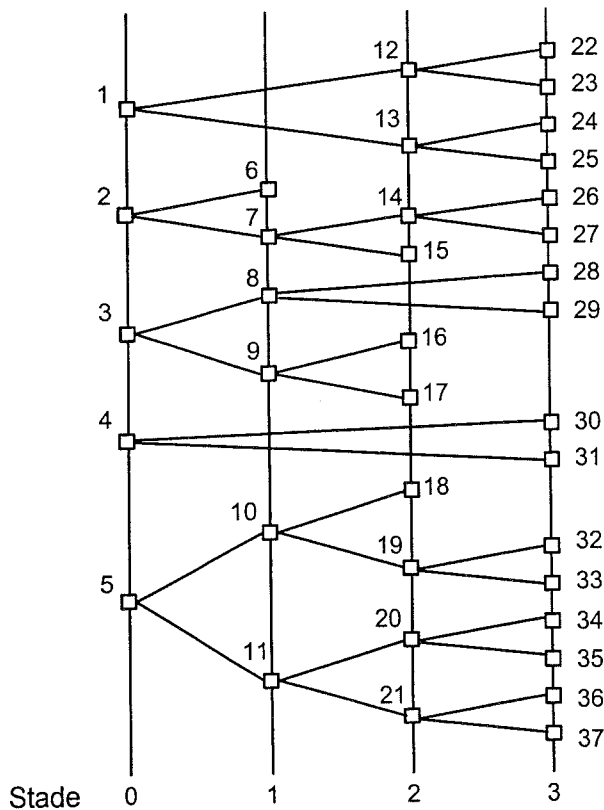


Fig. 56. – Exemple de découpage dans le scénario D. Nombre initial de blocs $N_0=5$. Probabilité qu'un bloc quelconque soit fragile $p=3/5$. A partir du stade 0 (5 blocs), on choisit pour division $N_0 \cdot p = 3$ blocs (les blocs 2, 3 et 5). On obtient ainsi $2 \cdot N_0 \cdot p = 6$ nouveaux blocs (6, 7, 8, 9, 10, 11) au stade 1. Au stade 1, on a $N_1 = 2 \cdot N_0 \cdot p + N_0 \cdot (1-p) = N_0 \cdot (p+1) = 8$ blocs (les blocs 1, 6, 7, 8, 9, 10, 11). On choisit pour division $N_1 \cdot p = 24/5 \approx 5$ blocs (1, 7, 9, 10 et 11), et on obtient ainsi 10 nouveaux blocs (12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21) au stade 2. Au stade 2 ; on a $N_2 = N_1 \cdot (p+1) = 8 \cdot 8/5 \approx 13$ blocs, parmi lesquels on choisit $N_2 \cdot p = 39/5 \approx 8$ blocs pour les diviser (les blocs 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21), etc... Le nombre de blocs à diviser à chaque stade est arrondi à l'unité la plus proche.

Le tableau ci-après (fig. 57) résume les quatre scénarii envisagés dans notre expérimentation, et avec nos hypothèses de base (fractures planes, blocs convexes).

2.1.2. Distance minimale germe-fractures

Un paramètre important lors de l'étude de la fracturation naturelle dans les forages carottés est la distance observée entre les fractures. En effet, la présence d'une fracture préexistante rend plus difficile la naissance d'une fracture d'orientation similaire à son voisinage immédiat. C'est un phénomène qualifié d'écrantage. Souvent, en effet, les discontinuités constituent une zone fragilisée, et l'apparition de nouvelles contraintes tend à provoquer le rejeu de ces discontinuités préexistantes plutôt que la création de nouvelles ruptures. On peut donc concevoir l'existence d'une distance minimale Δ_F , de part et d'autre de chaque plan de fracture, en deçà de laquelle aucune génération de fracture n'est possible (fig. 58). Nous désignerons par Δ_F ce paramètre, que nous nommerons « distance interfracturale minimale » dans la suite du propos.

Soit G un « germe » généré dans l'un des processus A, B, C ou D. Ce germe $G(x_G, y_G, z_G)$ est contenu dans un bloc limité par n plans de fracture P_i , d'équations cartésiennes $a_i x + b_i y + c_i z + d_i = 0$, avec $i = 1, \dots, n$. La distance de G à chaque plan P_i est donnée par :

$$d_i = \frac{|a_i x_G + b_i y_G + c_i z_G + d_i|}{\sqrt{a_i^2 + b_i^2 + c_i^2}}$$

On considère la valeur minimale d des n distances d_i . Pour imposer une distance minimale entre fractures dans le modèle, on peut mettre en œuvre le contrôle suivant :

- Si $d \geq \Delta_F$, le germe G est viable
- Si $d < \Delta_F$, le germe G doit être abandonné, et un autre choix de germe doit être fait, sans pour autant abandonner le bloc dans lequel ce germe doit apparaître.

2.2. Caractérisation typologique descriptive

Les mesures de terrain concernant les volumes de blocs étant rarissimes, la confrontation des résultats de simulations aux données réelles n'est possible que par le biais de sections (2D) ou de relevés des intersections de fractures selon des profils linéaires (1D) dans le modèle. Une caractérisation qualitative et quantitative de l'organisation des réseaux en coupe est donc importante. Les coupes sont réalisées par un programme spécifique. Leur représentation est faite dans les figures de notre travail, par l'outil AutoCAD.

2.2.1. Caractérisation des réseaux en coupe

2.2.1.1. Scénario B

Les coupes montrent une répartition assez homogène des traces de fractures, phénomène qui trouve

	Méthode	Processus A	Processus B	Processus C	Processus D
Etape	Organisation des fractures	séquentielle		en salves	
1	Choix du ou des blocs à fracturer	Unitaire Aléatoire	Unitaire Aléatoire pondéré par le volume	sans remise en jeu du bloc	avec remise en jeu du bloc
		Probabilité $\frac{1}{N}$	Probabilité $\frac{V_i}{V_T}$	Probabilité p (paramètre)	
2	Choix du « germe » dans le bloc à fracturer	Aléatoire, avec ou sans distance minimale germe-fracture imposée Δ_F			

FIG. 57.— Récapitulatif des processus de découpage employés. Fractures planes. Dans un modèle de volume V_T comportant N blocs, la probabilité de fragmentation d'un bloc B_i de volume V_i est $1/N$ dans le cas du scénario A, et V_i/V_T dans le cas du scénario B. Cette probabilité p est donnée en paramètre dans le cas des scénarii C et D.

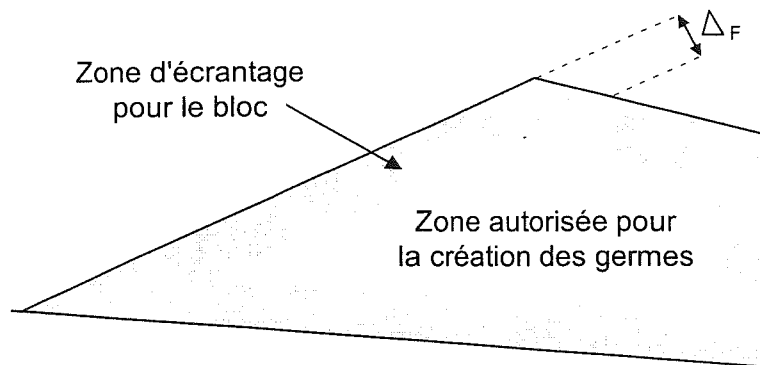


Fig. 58.— Représentation en deux dimensions de la notion de « distance interfracturale minimale » Δ_F . Le polygone représente la coupe d'un bloc selon un plan arbitraire, chaque côté du polygone représente la coupe d'une face. A une distance des plans de ces faces inférieure ou égale à Δ_F , la création de germes est interdite (zones ombrées).

évidemment son origine dans la méthode de pondération du choix du bloc à fracturer par le volume. Cette régularité apparaît tôt dans la génération des fractures (fig. 60) et elle est conservée pour des nombres de fractures croissants.

L'introduction d'une distance interfracturale minimale entraîne l'impossibilité de poursuivre la fracturation au-delà d'un certain stade. Pratiquement, cette impossibilité est définie arbitrairement : elle est traduite dans l'algorithme par l'échec au bout de 50 000 tentatives, de recherche d'un germe satisfaisant aux conditions de distance, ceci dans chaque bloc du modèle. Un aperçu du nombre de fractures nécessaires à cette quasi-saturation est donné par la figure 59.

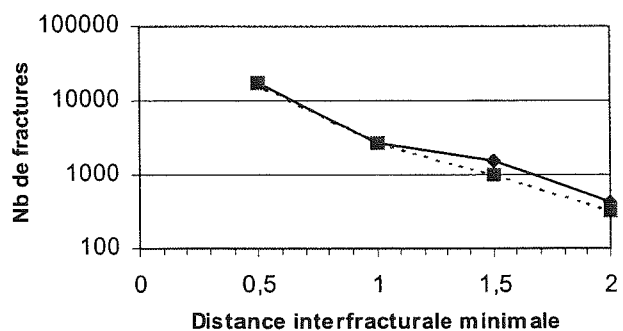


FIG. 59.— Nombre maximal de fractures en fonction de la valeur Δ_F , pour les scénarii A (trait plein) et B (pointillé). Dimension arbitraire du modèle : cube de 50 unités de côté. Pour $\Delta_F=0,1$, on génère 150 000 fractures sans atteindre la saturation.

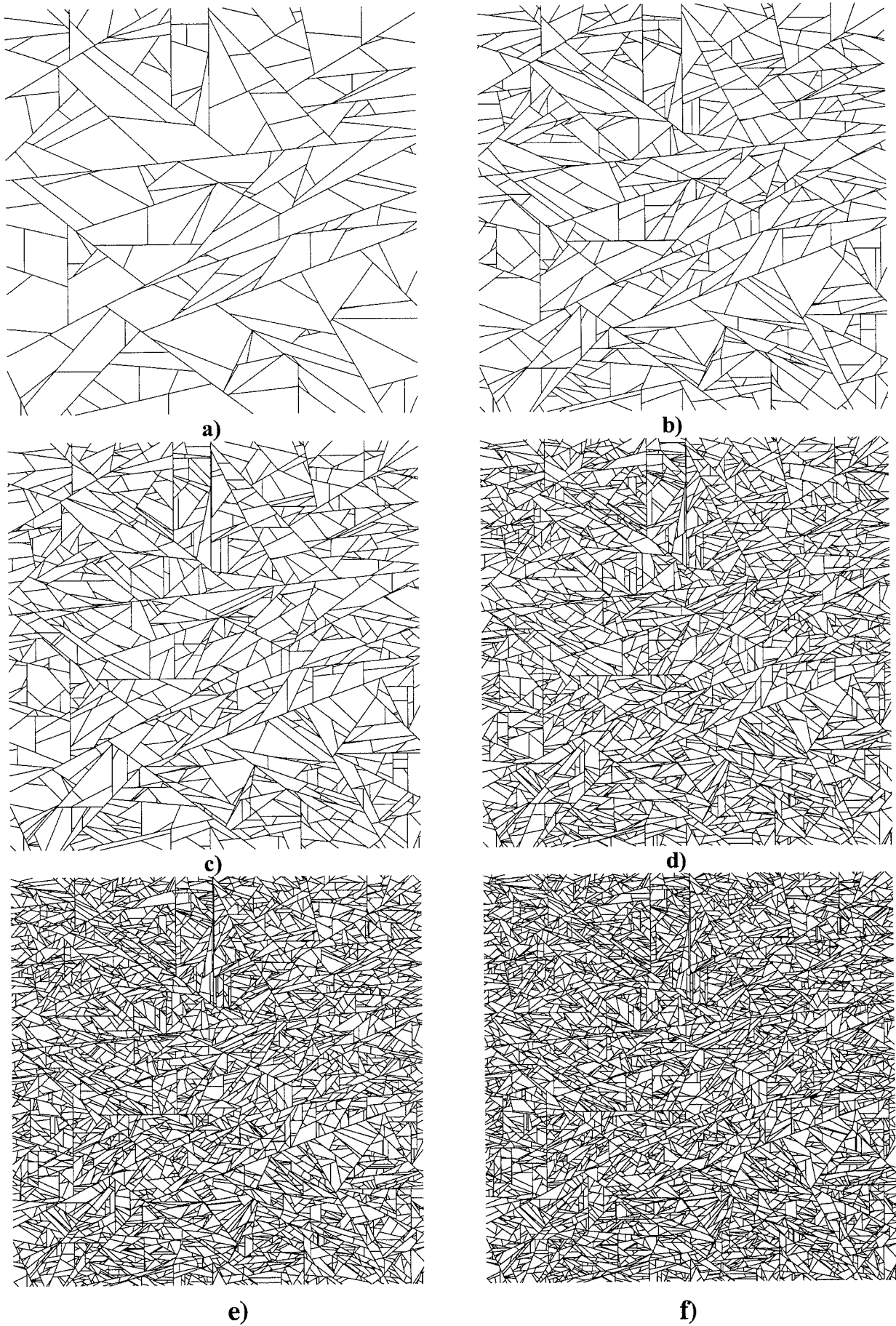


FIG. 60.— Scénario B. Coupes dans le modèle. a) 1000, b) 5000, c) 10000, d) 50000, e) 100000, et f) 150000 fractures. Distance interfracturale minimale $\Delta_F = 0$.

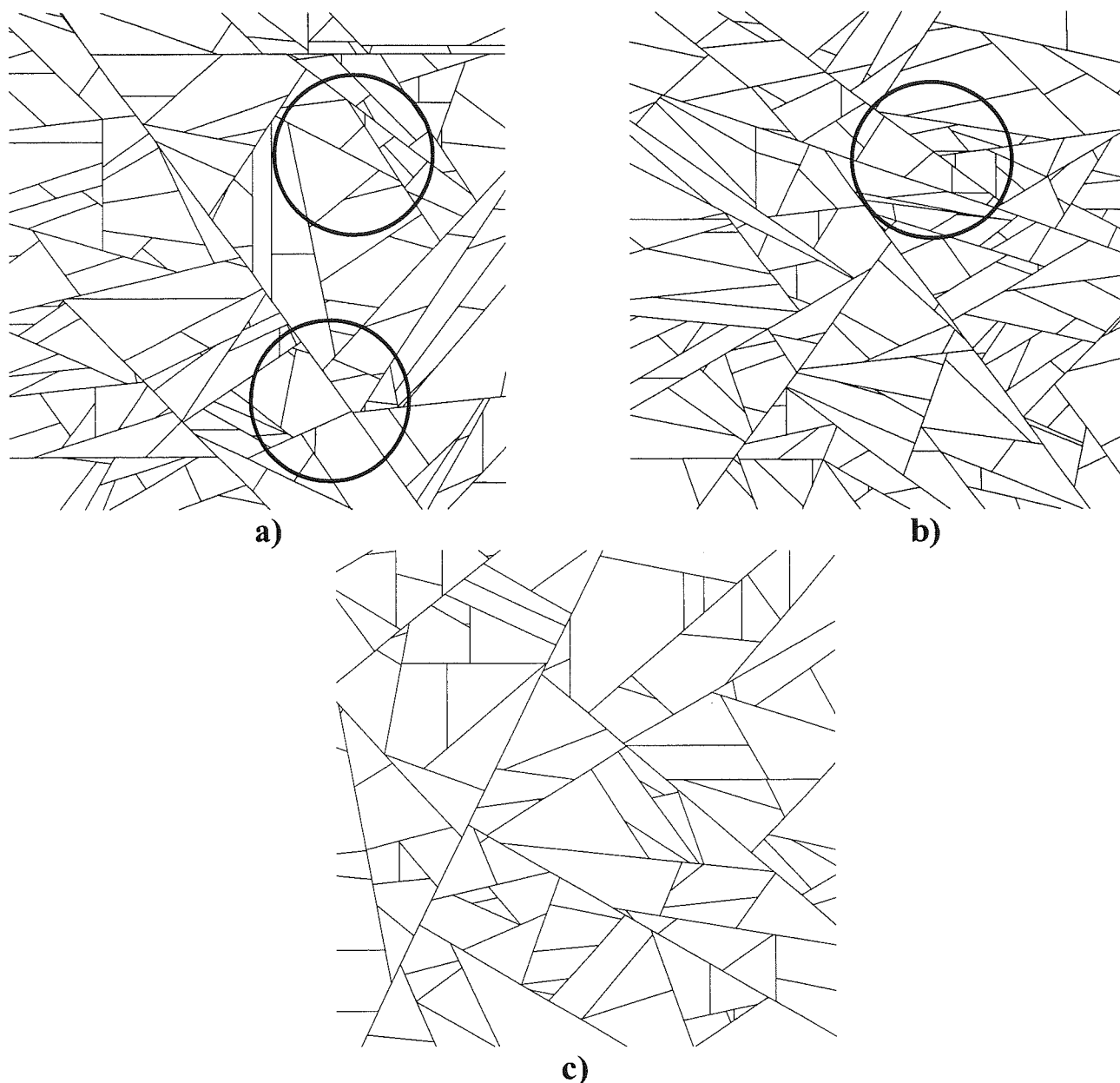


FIG. 61.– Scénario de découpage B. Coupes dans le modèle pour 1000 fractures générées. Distances interfractionnelles minimales $\Delta_F = 0$ (a) et $\Delta_F = 1,5$ (b). Pour $\Delta_F = 2$ (c), la saturation est atteinte pour 370 fractures. Les zones cerclées montrent des exemples d'hétérogénéités fortes. Ces hétérogénéités tendent à disparaître pour $\Delta_F = 2$ (c).

L'introduction d'une distance interfractionnelle minimale plus importante, pour un même nombre de fractures générées modifie la maille minimale du réseau (fig. 61). La différence n'est appréciable visuellement que pour des valeurs de Δ_F supérieures à 0,5 soit 1/100^{ème} de la dimension de l'arête du modèle. Pour $\Delta_F = 0$, toutefois, l'image présente déjà pour un faible nombre de fractures des hétérogénéités (fig. 61) qui disparaissent peu à peu lorsque l'on impose une valeur Δ_F croissante.

La figure 62 présente des coupes pour une distance interfractionnelle minimale de $\Delta_F = 0,5$, et pour 5000 (a), 10 000 (b) et 21 795 fractures (c), la quasi-saturation étant atteinte pour cette valeur du nombre de fractures. Pour pallier ce problème, on pourrait envisager une distance interfractionnelle variable, dépendante de la taille du bloc par exemple.

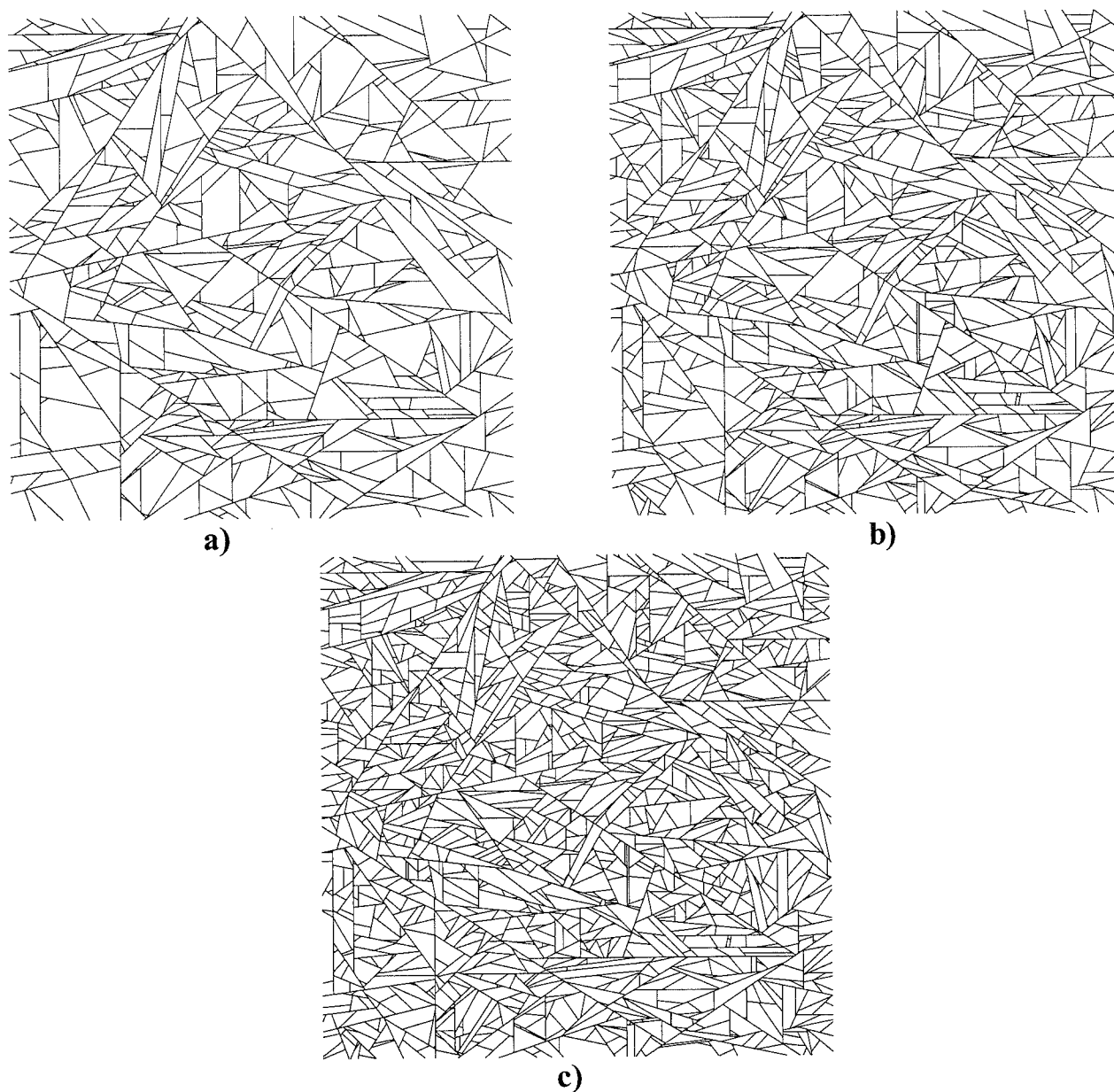


FIG. 62.– Scénario de découpage B. Coupes dans le modèle pour a) 5000, b) 10 000, et c) 21 795 fractures. Distance interfracturale minimale $\Delta_F = 0,5$. La saturation est atteinte pour 21 795 fractures (c). Les figures a) et b) sont à comparer respectivement à 60b et 60c.

2.2.1.2. Scénario A

Les coupes correspondantes montrent de fortes hétérogénéités de densité pour les traces de fractures. Celles-ci sont groupées en amas de tailles et formes variables. De la même façon que pour le scénario B, l'irrégularité apparaît tôt lors de la génération des fractures et elle persiste ensuite (fig. 63). La naissance d'amas est due à l'équiprobabilité de choix d'un bloc

pour le diviser, sans prendre en compte le volume de chaque bloc. On divise ainsi de plus en plus de petits blocs. L'introduction d'une distance interfracturale minimale Δ_F tend à élargir la maille dans les amas, et donc à réduire le gradient de densité de traces de fractures. Le phénomène est apparent surtout pour $\Delta_F \geq 0,5$ (fig. 64). On obtient alors des images qui se rapprochent de celles obtenues en mode B (fig. 60).

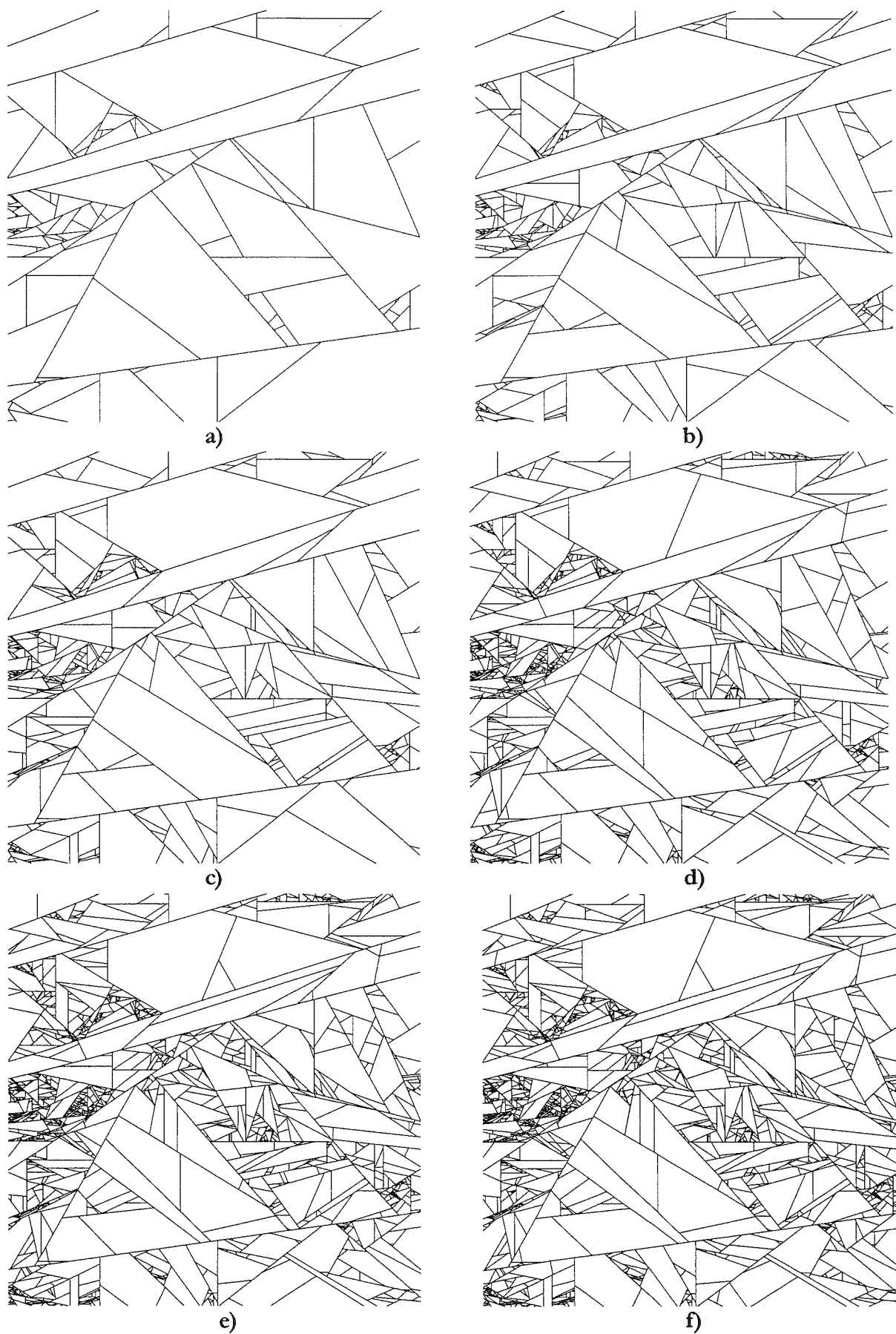


Fig. 63.– Scénario A. Coupes dans le modèle. a) 1000, b) 5000, c) 10000, d) 50000, e) 100000 et f) 150000 fractures. Distance interfracturale minimale $\Delta_F = 0$.

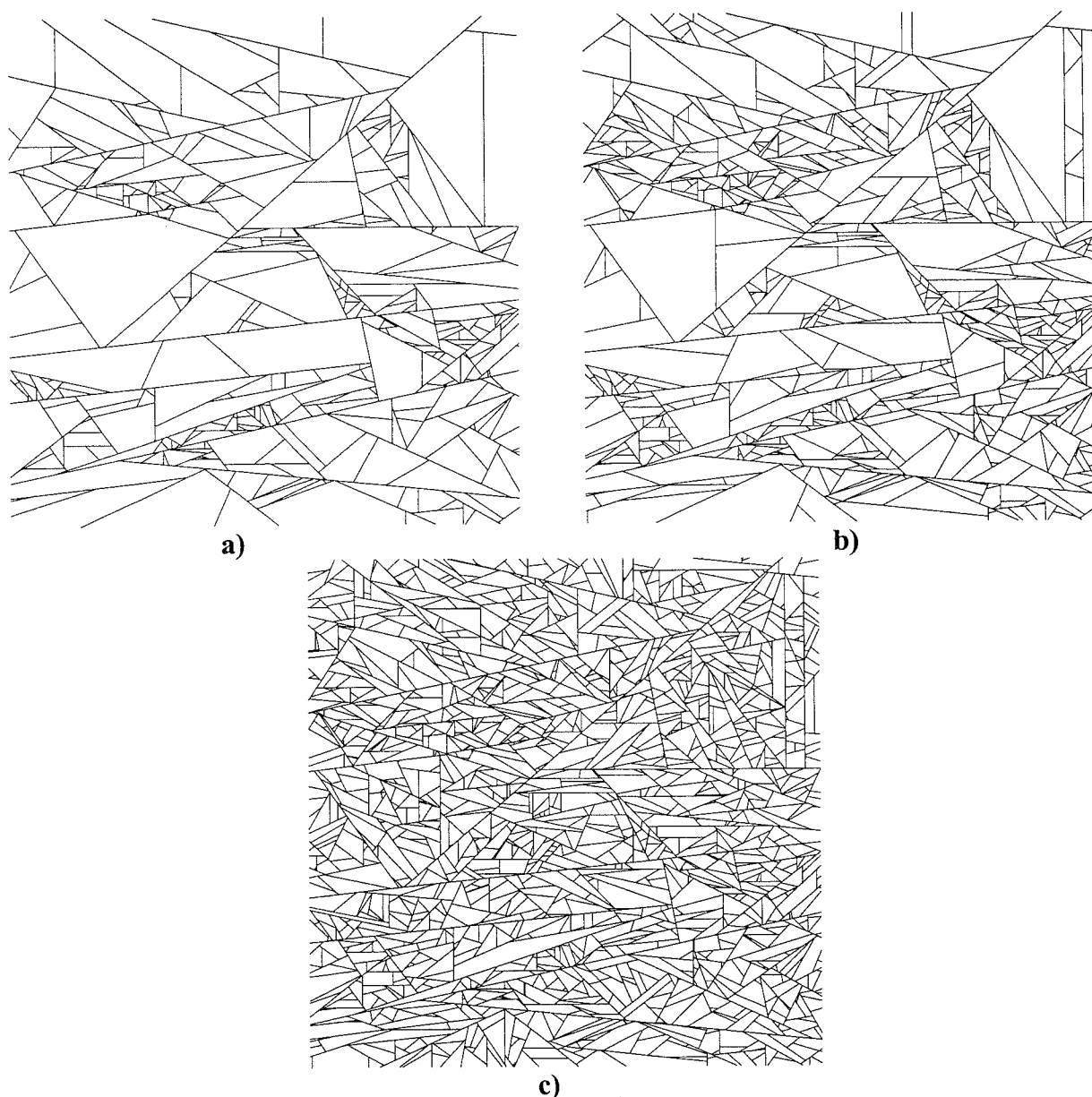


FIG. 64.- Scénario de découpage A. Coupes dans le modèle, pour a) 5000, b) 10 000, et c) 23 103 fractures. Distance interfracturale minimale $\Delta_F = 0,5$. La saturation est atteinte pour 23103 fractures (c). Les figures a et b sont à comparer respectivement à 63b et 63c.

2.2.1.3. Scénario C

La figure 65 montre l'évolution du mécanisme sur une coupe centrale du modèle, à partir d'un état initial de 101 blocs élémentaires (100 fractures) généré lui-même selon un découpage de type B (voir supra), et une probabilité de division constante de $p=0,6$. L'examen de ces sections au bout de 5, 10, 20 et 30 salves montre la constitution d'amas extrêmement accusés.

La figure 66 montre plusieurs simulations réalisées avec des probabilités différentes à partir d'un même découpage initial. Quelle que soit la probabilité, les structures correspondant à ce découpage initial

constituent l'« armature » du réseau.

2.2.1.4. Scénario D

Le processus de type D génère également des fractures regroupées en amas (fig. 67).

Ce résultat paraît paradoxal a priori : on s'attend en effet à ce que la remise en jeu des blocs après leur fracturation donne une homogénéité aux coupes. Cependant, dans ce cas comme dans le scénario A, le tirage des blocs est aléatoire et il n'y a pas de pondération par le volume. Le processus tend donc à fragmenter des blocs de taille de plus en plus petite, ce qui est à l'origine de cette observation.

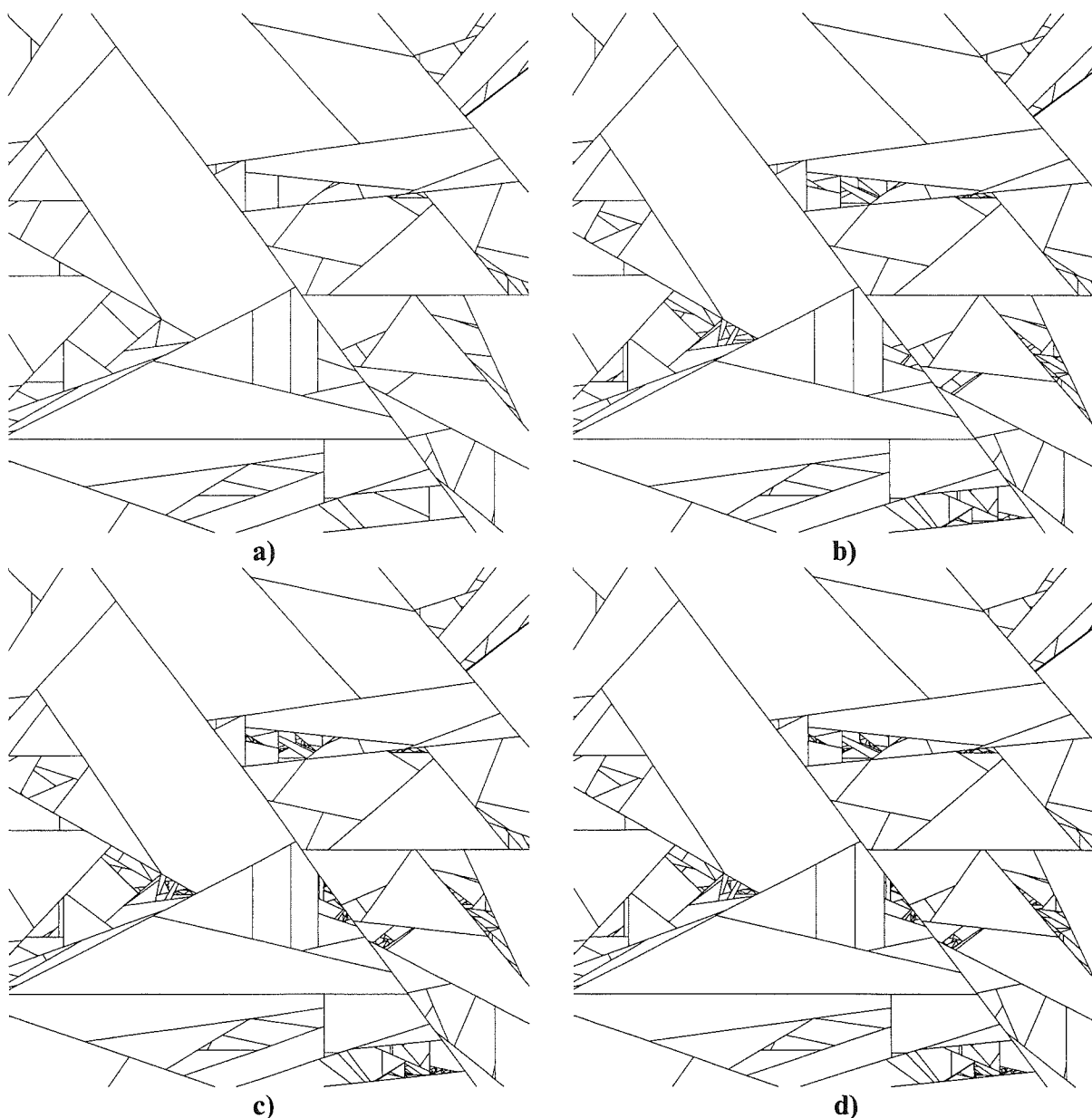


FIG. 65.— Scénario de découpage C. Probabilité de division d'un bloc $p=0,6$. Coupes dans le modèle après 5 salves (552 blocs, a)), 10 salves (1680 blocs, b)), 20 salves (11437 blocs, c)) et 30 salves (71841 blocs, d)). On note l'apparente identité entre les coupes pour 20 et 30 salves (c et d), due au fait que la division, qui n'intervient que sur les blocs les plus petits, est invisible à cette échelle.

2.3. Loïs statistiques observées

Après une introduction des différentes lois statistiques rencontrées dans l'exploration théorique de notre modèle, nous présenterons les résultats obtenus pour les distributions des volumes, puis des longueurs de traces.

2.3.1. Loïs statistiques de distribution d'un paramètre

Nous abordons ici les différentes lois testées, et les procédures d'ajustement utilisées dans l'étude.

2.3.1.1. Distributions testées

Un ajustement statistique des diverses distributions obtenues a été tenté sur diverses lois (lognormale, bêta, gamma, Weibull, puissance, Rayleigh, exponentielle, valeur extrême).

Nous ne présentons ici que les lois pour lesquelles nous avons obtenu des résultats significatifs. L'estimation des paramètres du maximum de vraisemblance pour ces différents types de distribution est faite par transformation de la distribution normale [Evans *et al.*, 1993].

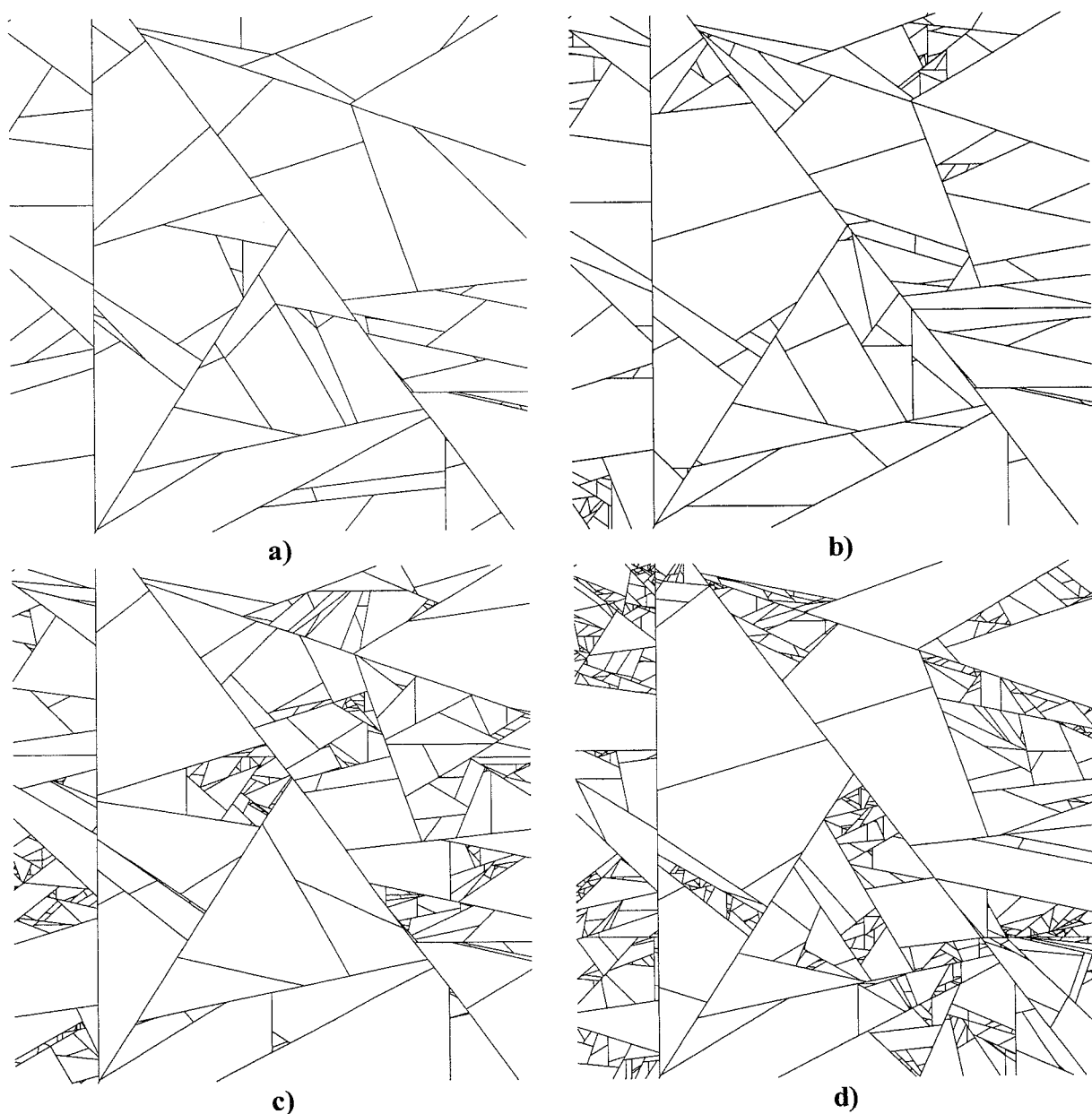


Fig. 66.- Scénario de découpage C. Simulations réalisées avec différentes probabilités : a) $p=0,5$ (603 blocs) ; b) $p=0,6$ (1680 blocs) ; c) $p=0,7$ (5043 blocs) ; d) $p=0,8$ (14787 blocs), à partir d'une base initiale de 101 blocs élémentaires. Coupes dans le modèle après 10 salves.

A - Loi lognormale

La densité de probabilité de cette loi est donnée par :

$$f(x) = \frac{1}{x \cdot \sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\log x - \mu)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (\text{II.13})$$

où : $0 < x < \infty$

$\sigma > 0$ est le paramètre de forme, et correspond à l'écart-type de la distribution de la fonction définie par $y = \log x$, et

$\mu > 0$ est le paramètre d'échelle, et correspond à la

moyenne de la distribution de la fonction définie par $y = \log x$.

Cette distribution est définie pour $x > 0$. Pour permettre un ajustement pour les valeurs de x supérieures à une valeur strictement positive, paramétrable, l'outil statistique que nous utilisons (cf ci-dessous) autorise l'emploi d'un paramètre de position (ou niveau), θ , réel. L'outil retranche cette valeur aux données avant de faire l'ajustement lognormal. Pour cette raison, la valeur de ce paramètre de position saisi pour l'estimation doit toujours être inférieure ou égale

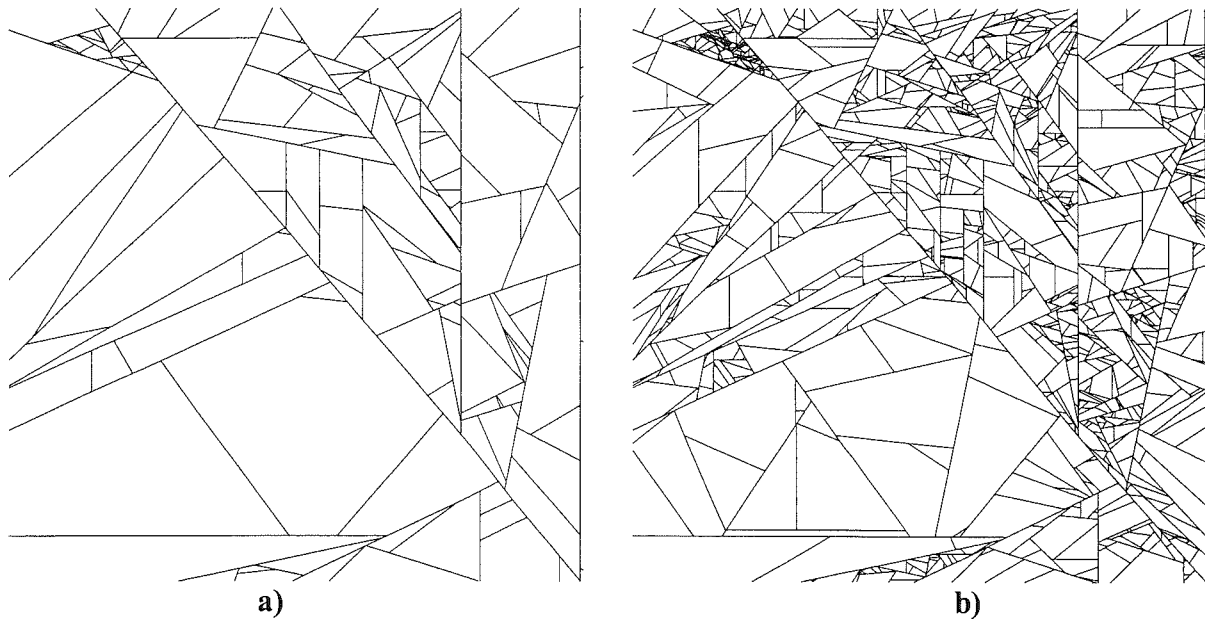


Fig. 67.– Scénario de découpage D. Coupes dans le modèle pour une probabilité $p = 0,6$ à partir d'un état initial de 9 blocs. Les 2 coupes sont réalisées respectivement après a) 10 salves et b) 18 salves.

à la valeur minimale de la variable étudiée. L'ajustement se fait ainsi à l'aide de la fonction suivante :

$$g(x) = \frac{1}{(x - \theta) \cdot \sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\log(x - \theta) - \mu)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (\text{II.14})$$

Une loi lognormale est obtenue si le logarithme d'une variable aléatoire suit une loi normale. Il est pratique de définir, pour caractériser la forme et la dispersion des distributions lognormales, le coefficient de variation défini par :

$$c_V = \frac{\sigma}{\bar{x}}, \text{ où } \sigma \text{ est l'écart-type et } \bar{x} \text{ la moyenne}$$

de la distribution de la variable considérée [Turcotte, 1997]. Lorsque c_V tend vers 0, la distribution lognormale tend vers une fonction centrée symétrique. Quand c_V augmente, la distribution s'étale, devient de plus en plus dissymétrique, et prend son maximum pour des valeurs de x de plus en plus petites. On montre que la loi lognormale est parfaitement caractérisée par son coefficient de variation [Mandelbrot *et al.*, 1968].

La loi normale pouvant, selon le théorème central limite, être considérée comme la somme d'un grand nombre de variations indépendantes, la distribution lognormale peut être vue comme le résultat de la multiplication d'un grand nombre de variations indépendantes. Cette loi donne de ce fait très souvent satisfaction dans les ajustements de lois de phénomènes naturels, qui mettent en cause un grand nombre de variables indépendantes [Evans *et al.*, 1993].

B - Loi Bêta

Cette loi est dérivée de la fonction gamma (dont la densité est $\Gamma(x) = \int_0^\infty e^{-t} t^{x-1} dt$). Sa fonction de densité est donnée par :

$$f(x) = \frac{\Gamma(v + \omega)}{\Gamma(v)\Gamma(\omega)} x^{v-1} (1-x)^{\omega-1} \quad (\text{II.15})$$

où $0 \leq x \leq 1$, et v et ω sont des paramètres de forme (réels positifs)

Comme dans le cas de la loi lognormale, l'outil que nous utilisons introduit un paramètre de position θ et un paramètre d'échelle μ de façon à permettre les ajustements pour des valeurs de x particulières. Le paramètre de position saisi pour l'estimation doit être inférieur à la valeur minimum de la variable, et la somme $(\theta + \mu)$ doit être supérieure ou égale à la valeur maximale. Ainsi, la fonction utilisée pour l'ajustement est :

$$g(x) = \frac{\Gamma(v + \omega)}{\Gamma(v)\Gamma(\omega)} \frac{(x - \theta)^{v-1} (\mu + \theta - x)^{\omega-1}}{\mu^{v+\omega-1}} \quad (\text{II.16})$$

Cette distribution a la particularité d'être bornée des deux côtés. Elle est donc souvent utilisée pour représenter des processus ayant des limites naturelles inférieure et supérieure [Hahn et Shapiro, 1967].

C - Loi de Weibull

Sa fonction de densité est définie par :

$$f(x) = \frac{\sigma}{\mu} \left(\frac{x}{\mu} \right)^{\sigma-1} e^{-\left(\frac{x}{\mu} \right)^{\sigma}} \quad (\text{II.17})$$

où : $0 \leq x < \infty$

$\theta > 0$ est un paramètre de position

$\sigma > 0$ est un paramètre de forme, et

$\mu > 0$ est un paramètre d'échelle.

Comme pour les autres distributions, l'outil utilisé propose un paramètre de position $\theta > 0$ dont la valeur est retranchée de x avant ajustement. Le paramètre θ saisi pour l'estimation doit être inférieur à la valeur minimale de la variable étudiée. La fonction d'ajustement est ainsi définie :

$$g(x) = \frac{\sigma}{\mu} \left(\frac{x - \theta}{\mu} \right)^{\sigma-1} e^{-\left(\frac{x - \theta}{\mu} \right)^{\sigma}} \quad (\text{II.18})$$

Nous avons vu dans la Première Partie que cette loi se réduit à une loi puissance pour des valeurs de x petites.

La distribution de Weibull est utilisée en statistique dans l'analyse chronologique du taux d'échec lorsque le probabilité d'échec varie au cours du temps (en sciences sociales, le taux de divorce par exemple) et de survie (en médecine, le nombre de jours de survie d'un patient atteint d'une maladie incurable). Lorsque cette probabilité est constante dans le temps, c'est la distribution exponentielle qui est utile [Hahn et Shapiro, 1967].

D - Loi puissance

La fonction puissance est définie pour $x > 0$, par :

$$f(x) = x^b, \text{ avec } b \text{ réel} \quad (\text{II.19})$$

L'ajustement est réalisé par l'intermédiaire de la fonction suivante :

$$g(x) = a x^b, \text{ avec } a \text{ et } b \text{ réels} \quad (\text{II.20})$$

D'un point de vue pratique, on trouve dans la littérature (voir par exemple Pickering *et al.* [1995]) trois applications couramment utilisées :

- *Fonction de distribution cumulée* (voir par exemple Childs *et al.*, [1990] ; Walsh *et al.* [1991] ; Jackson et Sanderson [1992]) :

$$N = a x^b \quad (\text{II.21})$$

où x est une mesure de taille et N le nombre cumulé de valeurs supérieures ou égales à x .

- *Distribution de fréquences discrètes* (voir par exemple Heffer & Bevan [1990])

$$n = a' x - b' \quad (\text{II.22})$$

où n est la fréquence de valeurs dans l'intervalle $x \pm dx$

- *Intervalle logarithmiques* (ou fréquences discrètes de $\log x$) [Gutenberg & Richter, 1954]

$$\log n' = a'' - b'' \cdot \log x \quad (\text{II.23})$$

où n' est la fréquence des valeurs dans l'intervalle $\log u \pm d(\log u)$

2.3.1.2. Ajustement

A - Les biais dans l'échantillonnage

L'échantillonnage dans l'étude de la fracturation occasionne deux types de biais principaux [Einstein et Baecher, 1983] : la troncature et la censure. Il y a troncature dans un échantillon si les valeurs extrêmes (minimum et/ou maximum) sont différentes de celles de la population tout entière. Il y a censure si certaines valeurs de la population réelle sont sous-représentées dans l'échantillon. Ces biais sont susceptibles d'affecter *a priori* les divers éléments constitutifs de notre modèle.

Pour les plus petites valeurs d'une distribution, la troncature (LHT ou *left-hand truncation*) ou la censure sont, dans le cas d'échantillons naturels, à relier à la résolution de la méthode de mesure. Il y a perte de données à l'approche de cette limite de résolution. Une correction possible est d'exclure simplement les données correspondantes. Ce biais ne concerne notre étude que pour les valeurs inférieures à la précision des calculs effectués dans le modèle, qui est toujours très inférieure à la valeur minimale relevée pour une fracture. Nous pouvons donc négliger cette erreur.

Pour les plus grandes valeurs des distributions, la dimension des éléments de notre modèle sera évidemment limitée par la taille du volume modélisé, ce qui conduira à sous-estimer, dans notre modèle, la valeur maximale absolue pour une fracture ou un bloc (RHT ou *right-hand truncation*). Cet effet de taille finie a fait l'objet d'études apportant des propositions de correction, essentiellement sur des lois lognormales et exponentielles négatives [Cruden, 1977 ; Priest *et al.*, 1981 ; Einstein et Baecher, 1983]. En revanche, en présence d'une loi puissance, quelle que soit la gamme d'échelles considérée, les petites valeurs sont toujours plus nombreuses que les grandes valeurs, ce qui rend ce type de distribution moins sensible au problème de la troncature droite [Pickering *et al.*, 1995].

B - Méthodes d'ajustement employées

Nous avons réalisé l'ajustement de ces distributions classiques sur nos données en mettant en œuvre la méthode numérique du maximum de vraisemblance [Aki, 1965 ; Utsu, 1965 ; Hahn et Shapiro, 1967] à travers l'outil Statistica® de Statsoft.

De façon à limiter au maximum les biais dans l'appréciation des lois puissances, nous nous basons sur l'étude de comparaison des méthodes de détermination de la dimension fractale, faite par Pickering *et al.* [1995]. Ces travaux évaluent les 3 méthodes traditionnelles de représentation graphiques des données de fracturation correspondant aux 3 applications de la loi puissance données ci-dessus : fréquences cumulées, fréquences discrètes et intervalles logarithmiques. Les auteurs montrent que le graphe des fréquences cumulées est biaisé ; ils en proposent une méthode de correction. Ils rejettent l'emploi du graphe des fréquences discrètes qui introduit également un biais très important. Selon cette étude, le diagramme des intervalles logarithmiques donne des résultats satisfaisants pour l'évaluation de la dimension fractale. Ce diagramme est obtenu en portant en abscisses des intervalles de même taille sur une échelle logarithmique, plutôt que sur une échelle linéaire comme dans le cas du graphe des fréquences discrètes. Nous avons utilisé ce type de graphe pour caractériser les lois puissance dans notre étude.

Une méthode performante pour évaluer la qualité de l'ajustement d'une distribution théorique à une distribution observée est d'examiner le tracé de la distribution observée selon la distribution théorique ajustée. L'outil utilisé permet d'effectuer cette comparaison pour les distributions de Weibull, lognormale, bêta, gamma. Cela est possible avec l'aide de deux types de diagrammes :

Le diagramme des quantiles ou diagramme Q-Q (voir par exemple Hahn & Shapiro [1967]) permet de juger de la faisabilité de l'ajustement de lois théoriques d'une famille donnée, sur les données d'observation, en traçant les données observées selon les quantiles théoriques. Les paramètres de la loi théorique ajustée sont alors calculés à partir de valeurs estimées fournies par l'utilisateur. Les valeurs observées des variables sont représentées en ordonnée, et on porte en abscisse la distribution cumulée inverse (fonction de répartition inverse) de la loi à tester. La méthode du maximum de vraisemblance [Hahn et Shapiro, 1967] est ensuite utilisée pour déterminer les paramètres de la distribution. Un bon ajustement de la loi théorique est alors obtenu si les points se répartissent selon une droite (voir par exemple la figure 74 ci-après).

Le diagramme des probabilités ou diagramme P-P permet d'évaluer la qualité de l'ajustement d'une loi théorique donnée, sur les données observées. La distribution cumulée (fonction de répartition) observée est représentée en fonction de la distribution cumulée de la loi à tester. La qualité d'ajustement est d'autant meilleure que les points se répartissent sur une droite de pente 1 et d'ordonnée à l'origine 0 (voir par exemple la figure 74 ci-après). Ce type de diagramme confronte les données observées à une loi de distribution parfaitement

définie, c'est-à-dire dont on connaît tous les paramètres. Nous avons utilisé le diagramme des quantiles pour fournir une estimation de ces paramètres. Cependant, dans le cadre de notre étude, le diagramme Q-Q s'est avéré toujours suffisant pour rendre compte du type de distribution le plus représentatif des données.

Lors de l'étude des volumes des blocs, des longueurs de traces et des espacements interfracturaux, des lois puissance ont été mises en évidence, et la valeur de l'exposant D de ces lois a été donné. Pickering *et al.* [1995] ont montré la nécessité d'un traitement correctif pour limiter ou supprimer les effets de taille finie, pour les valeurs extrêmes d'un échantillon suivant une loi puissance. Cet effet de taille finie existe et a été constaté dans nos simulations comme dans les échantillons naturels. Cependant, nous nous sommes limités dans le cadre de ce travail à la qualification des distributions et, pour ce qui concerne les lois puissance, à leur identification. La détermination précise des exposants (voire de la dimension fractale) passerait impérativement par une correction. Dans la mesure où c'est de la comparaison relative des exposants que l'on tire le plus d'informations, il ne nous a pas paru utile d'appliquer ce correctif. L'estimation de la valeur intrinsèque de la dimension fractale n'est en effet pas le but premier de notre étude.

2.3.2. Lois relevées en 3D : volumes des blocs

Nous avons étudié la distribution statistique des volumes de blocs. Nous présentons ici les résultats obtenus pour chacun des scénarii A, B, C et D.

2.3.2.1. Caractérisation des types de processus de fragmentation

A - Approche générale

Une comparaison peut être faite entre les distributions obtenues dans les différents scénarios (fig. 69). Pour les processus A, B et D, l'allure générale est pratiquement lognormale. Pour chacune de ces trois courbes, on s'écarte de la distribution lognormale en s'éloignant de part et d'autre de la valeur modale. Les valeurs obtenues pour ces scénarios sont inférieures aux valeurs lognormales pour les petits volumes, et supérieures pour les gros volumes. Le scénario C montre quant à lui une distribution spécifique, présentant en partie une loi puissance.

A nombre de fractures égal, le processus B montre une valeur du mode supérieure à ceux du processus A : les blocs générés sont en moyenne plus gros.

Le coefficient $c_V = \frac{\sigma}{\bar{V}}$ (cf *supra*) donne une mesure de l'étalement de la distribution. Comme l'indique le tableau de la figure 68 correspondant à la figure 69, la dispersion c_V est maximale dans le cas C, indiquant

une asymétrie maximale, et elle est minimale dans le cas B, pour lequel on tend vers une distribution symétrique centrée.

Les processus C et D apparaissent donc très différents. Le phénomène de remise en jeu des blocs dans le type D conduit à un résultat intermédiaire entre les types B et A. Le processus C montre pour les volumes une distribution partiellement fractale, en accord avec la nature du processus de fragmentation impliqué.

Les différentes simulations auxquelles il est fait

référence dans le texte et dans les figures sont résumées dans les tableaux qui suivent (fig. 70, 71, 72, 73). Le temps total de traitement machine pour l'ensemble des simulations réalisées dépasse 5000 heures. Dans le but de clarifier l'exposé, il n'a pas été jugé utile d'inventorier d'une façon exhaustive les essais réalisés.

La conception de la base de données permet, nous l'avons vu, d'obtenir, à partir d'une simulation donnée, tous les états intermédiaires en termes de nombres de fractures. Aussi ne présentons-nous dans ces tableaux que le stade terminal de chaque simulation.

	A	B	C	D
σ	42	2	49	21
\bar{V}	2,5	2,5	1,7	2,5
c_V	16,8	0,8	28,1	8,4

FIG. 68. – Valeurs de la moyenne \bar{V} , de l'écart-type σ et de la dispersion c_V dans la distribution des volumes pour les 4 scénarios de fragmentation de la figure 69.

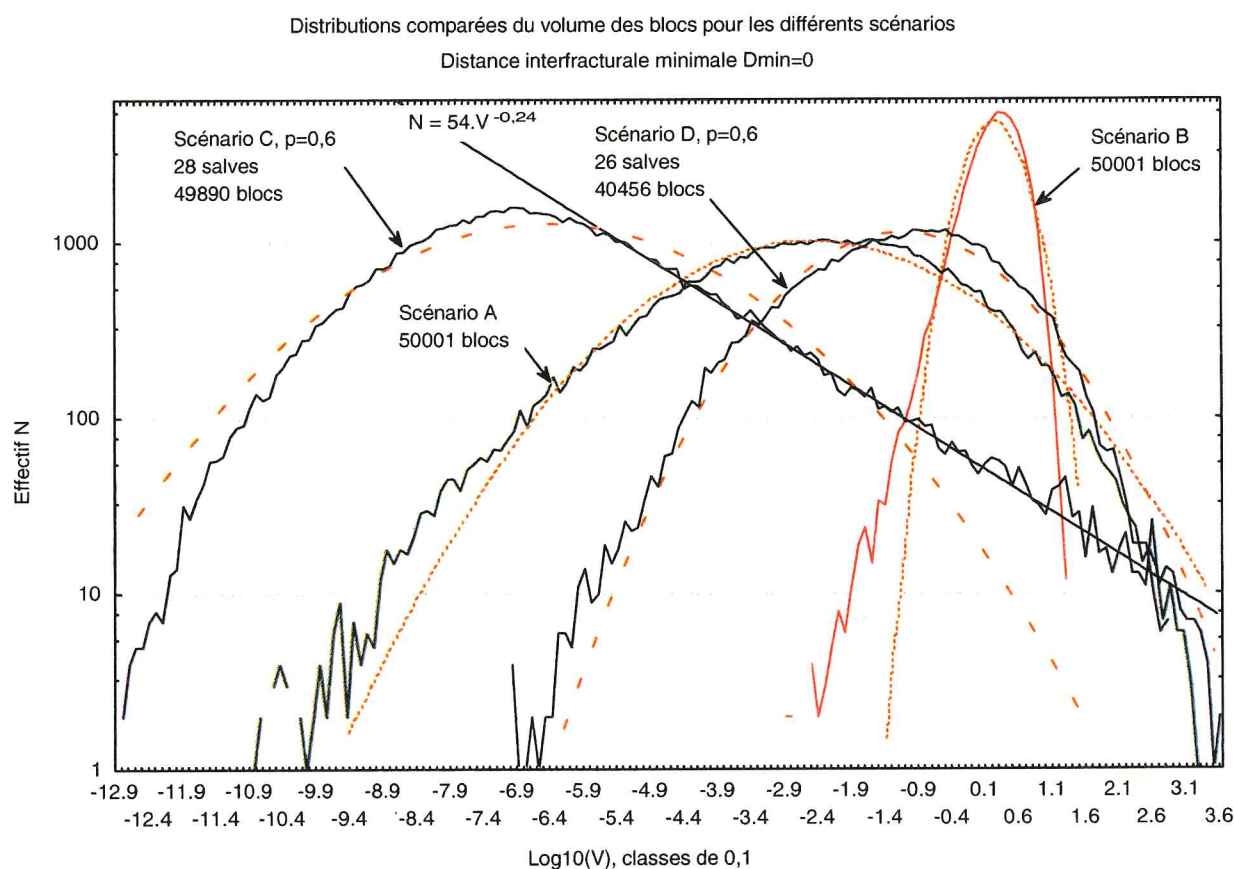


FIG. 69. – Forme comparée des distributions des volumes dans le modèle pour les 4 types de scénarios. Ajustement lognormal en trait pointillé. Ajustement en loi puissance (trait noir) pour le scénario C.

Ref	PARAMETRES		VOLUMES GENERES					
	Nb de fractures	D min	Nb blocs élément.	V min	V max	V moyen	Ecart type	Cv
2303	150 000	0	150 001	2.7E-17	4040	0.83	20.5	24.7
2708	100 000	0	100 001	6.5E-14	4040	1.25	25.7	20.6
0408	50 000	0	50 001	1.6E-13	4384	2.5	42.2	16.9
0208	33 784	0	33 785	4.10E-11	4998	3.7	61.0	16.5
1505	10 000	0	10 001	1.3E-09	6631	12.5	137.6	11.0
	5 000	0	5 001	3.6E-08	11389	25.0	234.2	9.4
	1 000	0	1 001	1.3E-06	11389	124.9	645.1	5.2
1805	10 000	0.05	10 001	7.2E-04	9 325	12.5	144.1	11.5
2208	150 000	0.1	150 001	5.5E-03	1 156	0.8	7.8	9.4
	100 000	0.1	100 001	5.5E-03	1 156	1.25	11.5	9.2
0508	50 000	0.1	50 001	5.5E-03	2240	2.5	22.3	8.9
1605-1	10 000	0.1	10 001	5.5E-03	4459	12.5	101.7	8.1
	5 000	0.1	5 001	6.5E-03	7517	25.0	179.7	7.2
	1 000	0.1	1 001	9.6E-03	10138	124.9	615.1	4.9
0708	23 103	0.5	23 104	5.9E-01	193	5.4	5.8	1.1
1605-2	10 000	0.5	10 001	6.7E-01	2625	12.5	51.2	4.1
	5 000	0.5	5 001	6.7E-01	2740	25.0	105.8	4.2
	1 000	0.5	1 001	7.6E-01	4489	124.9	404.0	3.2
2608-1	2 519	1	2 520	7.24	1232	49.6	54.7	1.1
1705-1	1 000	1	1 001	4.85	6442	124.9	37.8	0.3
2608-2	800	1.5	801	28.38	1711	156.1	135.4	0.9
1705-2	1 000	1.5	1 001	19.68	2955	124.9	199.7	1.6
2608-3	330	2	331	62.18	2 187	377.6	284.5	0.8

Fig. 70. – Tableau récapitulatif des simulations de type A référencées dans le texte et les figures. D min désigne la distance interfracturale minimale imposée, et Cv le coefficient de dispersion (quotient de l'écart à la moyenne). Les simulations pour lesquelles la saturation a été atteinte ont un numéro souligné.

Ref	PARAMETRES		VOLUMES GENERES					
	Nb de fractures	D min	Nb blocs élément.	V min	V max	V moyen	Ecart type	Cv
0505	50 000	0	50 001	3.6E-04	21	2.5	2.0	0.82
	10 000	0	10 001	3.6E-04	99	12.5	10.2	0.81
	5 000	0	5 001	1.5E-02	164	25.0	20.4	0.81
	1 000	0	1 001	1.48	575	124.9	98.5	0.79
	500	0	501	1.48	1244	249.5	206.7	0.83
2904	10 000	0	10 001	0.0	106	12.5	10.2	0.82
2504	5 000	0	5 001	0.1	286	25.0	21.0	0.84
1308-1	150 000	0.1	150 001	1.3E-02	10	0.8	0.6	0.77
	120 000	0.1	120 001	1.3E-02	13	1.0	0.8	0.78
	90 000	0.1	90 001	1.8E-02	13	1.4	1.1	0.78
	70 000	0.1	70 001	1.8E-02	16	1.8	1.4	0.78
1108	60 000	0.1	60 001	1.8E-02	17	2.1	1.6	0.79
0605	10 000	0.1	10 001	9.1E-02	114	12.5	10.2	0.81
	5 000	0.1	5 001	1.8E-01	197	25	20.5	0.82
	1 000	0.1	1 001	2.2E-01	697	125	104.1	0.83
0908-2	21 795	0.5	21 796	7.0E-01	56	5.7	4.2	0.74
0705-3	10 000	0.5	10 001	8.3E-01	102	12.5	9.2	0.73
	5 000	0.5	5 001	1.5	203	25.0	19.3	0.77
	1 000	0.5	1 001	2.0	742	124.9	104.8	0.84
0908-1	2 683	1	2 684	6.4	354	46.6	35.4	0.76
0705-2	1 000	1	1 001	8.3	686	124.9	93.2	0.75
0808	1 192	1.5	1 193	17.9	622	104.8	62.6	0.60
1705-3	1 000	1.5	1 001	17.9	622	124.9	78.1	0.63
2008	370	2	371	69.5	2846	336.9	292.0	0.87

Fig. 71. – Tableau récapitulatif des simulations de type B référencées dans le texte et les figures. D min désigne la distance interfracturale minimale imposée, et Cv le coefficient de dispersion (quotient de l'écart à la moyenne). Les simulations pour lesquelles la saturation a été atteinte ont un numéro souligné.

Ref	PARAMETRES			VOLUMES GENERES					
	Nb de Salves	Proba	Nb BE initiaux	Nb blocs élément.	V min	V max	V moyen	Ecart type	Cv
0606	4	0.1	5001	5 626	1.2E-02	203	22.2	20	0.9
1707	9	0.2	5001	6 668	6.8E-04	203	18.7	19	1.0
2107	3	0.3	5001	7 941	1.4E-03	203	15.7	18	1.1
2207	2	0.5	5001	5 001	3.7E-03	203	18.7	18	1.0
2407-1	5	0.5	101	351	3.1E-01	3908	356.1	560	1.6
2407-2	10	0.5	101	601	9.9E-04	5555	208.0	475	2.3
2407-3	20	0.5	101	1 101	1.9E-06	4266	113.5	369	3.2
2407-4	50	0.5	101	2 536	2.5E-14	5555	49.3	269	5.5
2605-1	28	0.55	101	7 555	1.0E-11	4266	15.4	131	8.5
2505-2	20	0.55	101	3 290	1.6E-09	5555	35.8	218	6.1
2407-5	5	0.6	101	556	2.4E-01	3881	224.8	460	2.0
2505-1	10	0.6	101	1 684	2.1E-04	5555	72.8	274	3.8
2407-6	20	0.6	101	11 452	1.2E-09	3315	10.9	112	10.2
2407-7	30	0.6	101	71 918	2.8E-14	5555	1.7	49	28.1
2405-2	20	0.6	9	964	2.0E-08	39226	129.7	1456	11.2
2405-1	10	0.6	9	170	9.2E-03	14962	735.3	2190	3.0
1606-1	11	0.7	101	7 119	1.65E-05	4266	17.6	138	7.8
1706-1	12	0.8	101	38 126	9.69E-07	3317	3.3	51	15.7
2805-1	5	1	101	3 232	1.3E-02	1030	38.7	61	1.6

FIG. 72. – Tableau récapitulatif des simulations de type C référencées dans le texte et les figures. Pour chaque simulation, le modèle de départ, dont le nombre de blocs est donné dans la colonne Nb BE initiaux, est réalisé avec un processus de type B, sans distance interfracturale minimale. Le volume minimum de blocs dans ce modèle de départ est de 9,5. Cv désigne le coefficient de dispersion (quotient de l'écart à la moyenne). Aucune distance interfracturale minimale imposée.

Ref	PARAMETRES			VOLUMES GENERES					
	Nb de Salves	Proba	Nb BE initiaux	Nb blocs élément.	V min	V max	V moyen	Ecart type	Cv
3105-2	10	0.6	9	942	1.7E-02	7005	132.7	377	2.8
0409	15	0.8	9	60 296	2.4E-07	416	2.1	8	4.0
1807	16	0.7	9	44 030	2.0E-07	853	2.8	16	5.6
3105-1	18	0.6	9	40 456	5.8E-08	2479	3.1	25	8.1

FIG. 73. – Tableau récapitulatif des simulations de type D référencées dans le texte et les figures. Pour chaque simulation, le modèle de départ, dont le nombre de blocs est donné dans la colonne Nb BE initiaux, est réalisé avec un processus de type B, sans distance interfracturale minimale. Le volume minimum de blocs dans ce modèle de départ est de 9,5. Cv désigne le coefficient de dispersion (quotient de l'écart à la moyenne). Aucune distance interfracturale minimale imposée.

B - Distribution des volumes dans le processus B

Les diagrammes P-P et Q-Q confirment que ce processus correspond à une loi lognormale (fig. 74).

Les paramètres θ et μ apparaissent sur les

diagrammes des quantiles par l'équation de la droite de régression $y = \theta + \mu \cdot x$. Le paramètre de forme σ prend des valeurs entre 0,5 et 0,6, sans corrélation nette ni avec le nombre de fractures, ni avec Δ_F . Le paramètre d'échelle μ décroît lorsque N augmente, pour Δ_F constant.

Pour $\Delta_F=0$, on obtient :

N	50000	10000	5000	1000
μ	3	16	24	105

Les valeurs du coefficient de dispersion c_V restent relativement stables sur le domaine étudié :

$$c_V = 0,78 \pm 0,06$$

On constate par ailleurs que les distributions obtenues dans ce processus peuvent également être ajustées sur une *loi bêta* (fig. 75), sans qu'un argument permette de trancher nettement entre l'un ou l'autre loi.

Par contre, les ajustements d'autres distributions sur les données de volumes issues du processus B, dont la loi de Weibull, ne donnent aucun résultat concluant.

Dans le cas de l'ajustement à une loi bêta, les paramètres de forme et d'échelle prennent des valeurs qui semblent dépendre très peu de Δ_F et du nombre de fractures N. On obtient, pour 50000 fractures et $\Delta_F=0$:

$$v = 1,3 \pm 0,1 \quad \omega = 10,0 \pm 0,5$$

$$\theta = 0,0 \pm 0,1 \quad \mu = 22 \pm 1$$

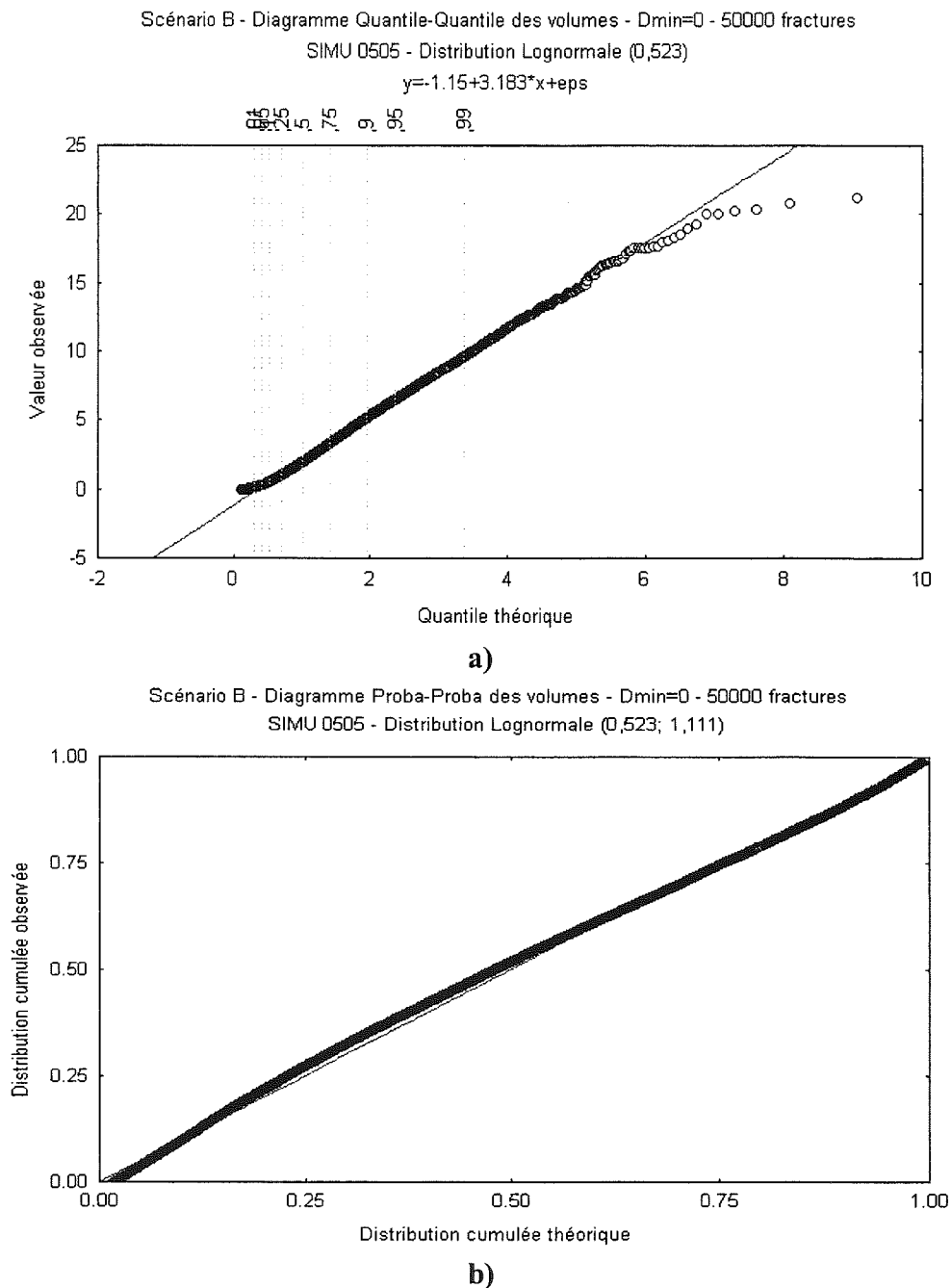


FIG. 74.- Scénario B, 50000 fractures, distance interfracturale minimale nulle. Diagrammes a) Q-Q et b) P-P pour la distribution des volumes des blocs, avec un ajustement sur une loi lognormale.

Univ. J. Fourier - O.S.U.G.
MAISON DES GEOSCIENCES
DOCUMENTATION
B.P. 53
F. 38041 GRENOBLE CEDEX
Tél. 04 76 63 54 27 - Fax 04 76 51 40 58
Mail : ptalour@ujf-grenoble.fr

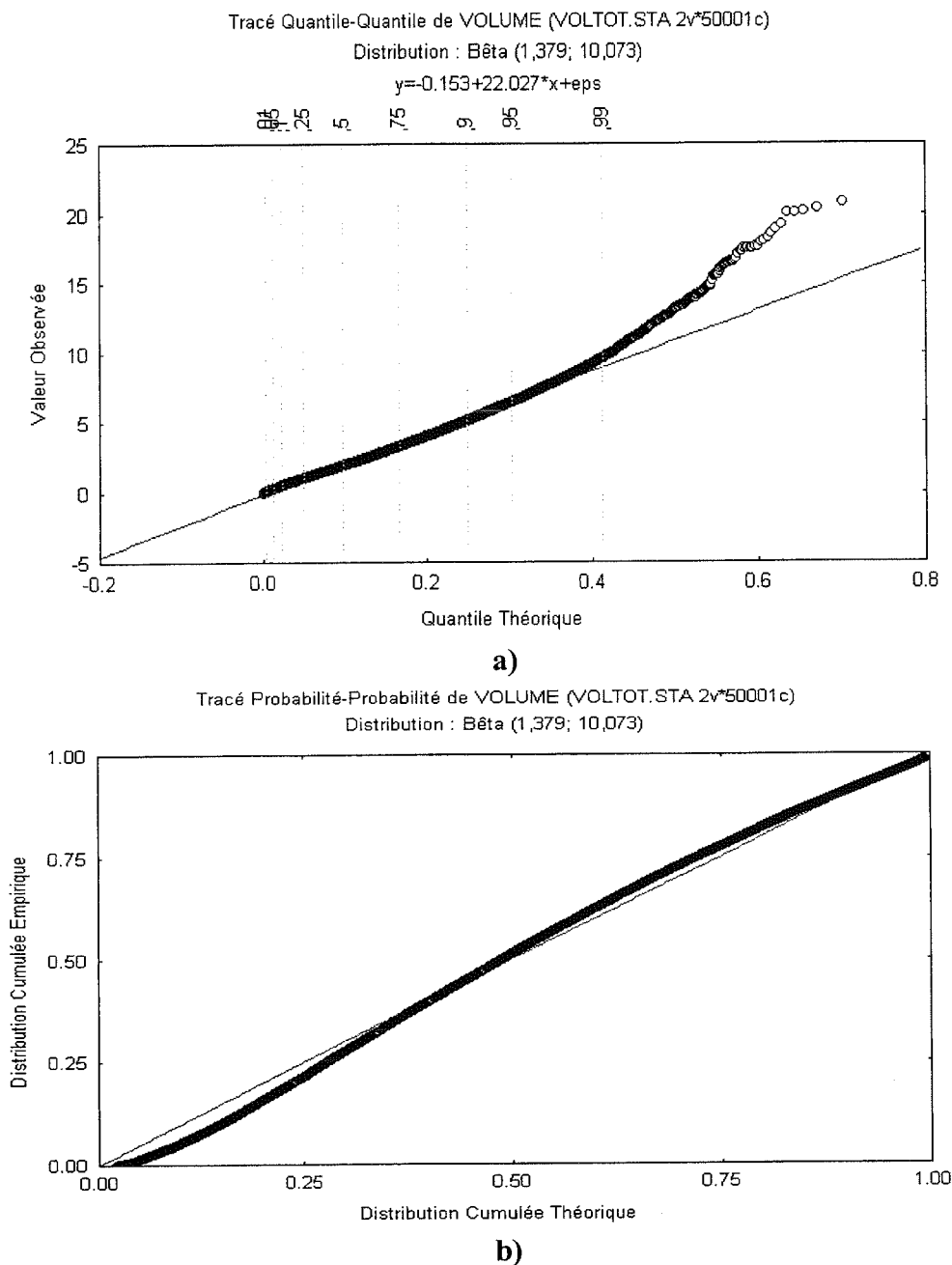


FIG. 75.- Scénario B, 50000 fractures, distance interfracturale minimale nulle. Diagramme a) Q-Q et b) P-P de la distribution des volumes des blocs, pour un ajustement sur une loi Beta.

C - Distribution des volumes dans le processus A

Nous avons obtenu des résultats significatifs lors de tentatives d'ajustements sur les lois lognormale, bêta et de Weibull. Cependant, pour ces trois types de lois, lorsque la distance Δ_F augmente, le nombre de fractures générées devient insuffisant et la qualité de l'ajustement décroît. Cet ajustement n'est plus significatif pour $\Delta_F > 2$, soit 4 % de l'arête du cube constituant l'enceinte du modèle.

- Loi lognormale

Les densités de probabilité de ce processus sont

ajustables en première approximation sur la loi lognormale pour un nombre de fractures significatif (fig. 76). En dessous de ce seuil, qui est de l'ordre de 600 à 800 fractures, les résultats d'ajustement ne sont pas fiables car ils varient selon la simulation.

Néanmoins, si le diagramme Q-Q révèle que l'ajustement est possible sur cette loi, la qualité de cet ajustement est donnée par le diagramme P-P. En prenant en compte les valeurs de σ et μ calculées par le diagramme Q-Q, nous n'obtenons pas sur le diagramme P-P d'alignement du nuage de points. (fig. 77). L'ajustement sur une loi lognormale est donc très médiocre.

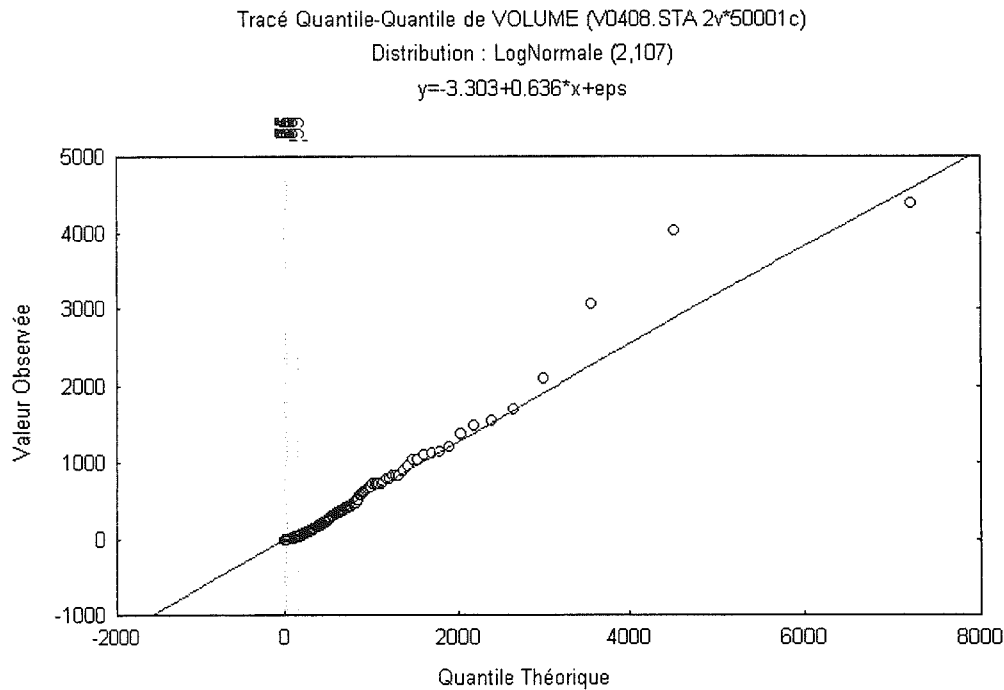


FIG. 76. – Ajustement de la distribution des volumes dans le processus A par une loi lognormale. Diagramme Q-Q. 50001 blocs.

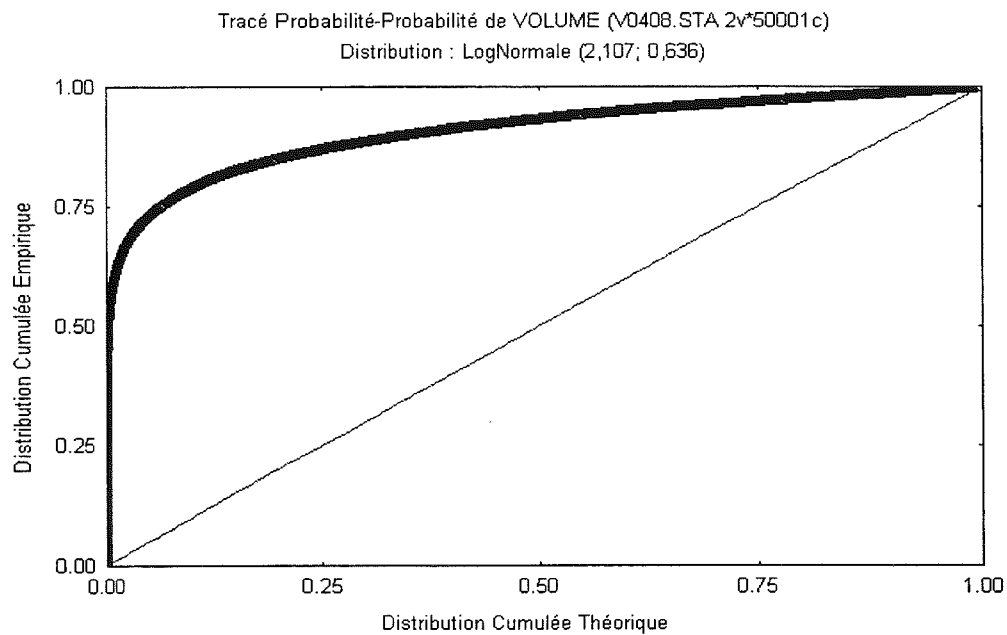


FIG. 77. – Tentative d'ajustement de la distribution des volumes dans le processus A par une loi lognormale. Diagramme P-P. 50001 blocs. Il n'y a pas d'ajustement des points sur la diagonale : l'ajustement lognormal n'est pas satisfaisant.

- *Loi bêta*

On constate (fig. 78 et 79) qu'on obtient de la même façon des résultats très médiocres lors d'un ajustement sur une loi bêta.

- *Loi de Weibull*

Cet ajustement est satisfaisant sur la partie droite de

la courbe (fig. 80 et 81), mais représente très mal la distribution des volumes inférieurs au mode (fig. 82).

Nous obtenons pour $N=50001$ blocs et $\Delta_F=0$ les valeurs des paramètres de forme σ , d'échelle μ et de position θ : $\sigma = 0,25 \pm 0,1$, $\mu = 0,17 \pm 0,05$, $\theta = 0 \pm 3$

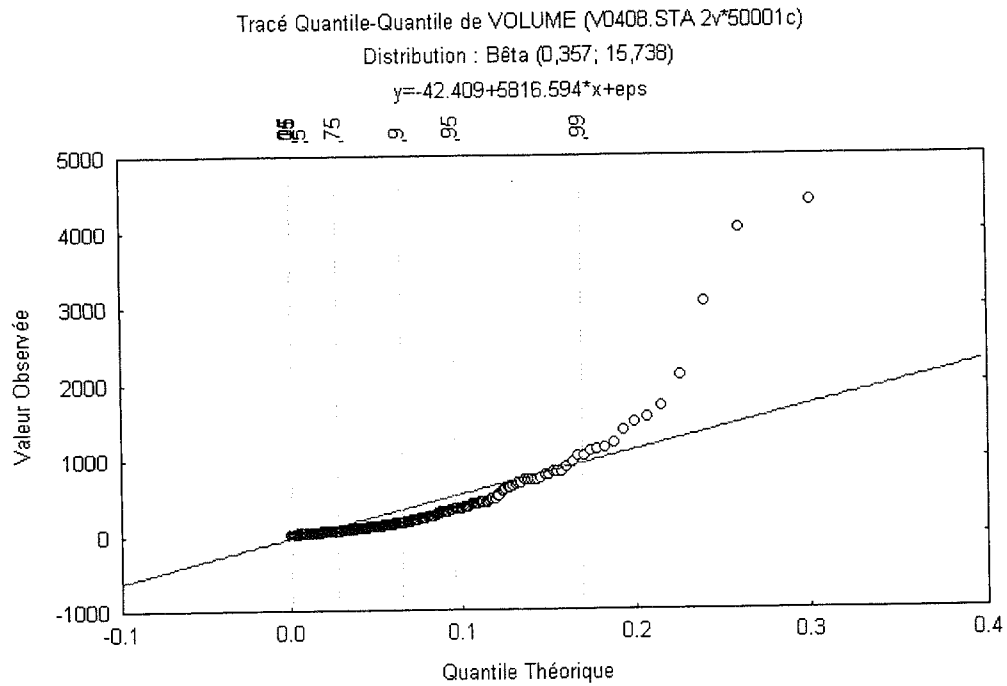


FIG. 78.— Tentative d'ajustement de la distribution des volumes dans le processus A par une loi bêta. Diagramme Q-Q. 50001 blocs.

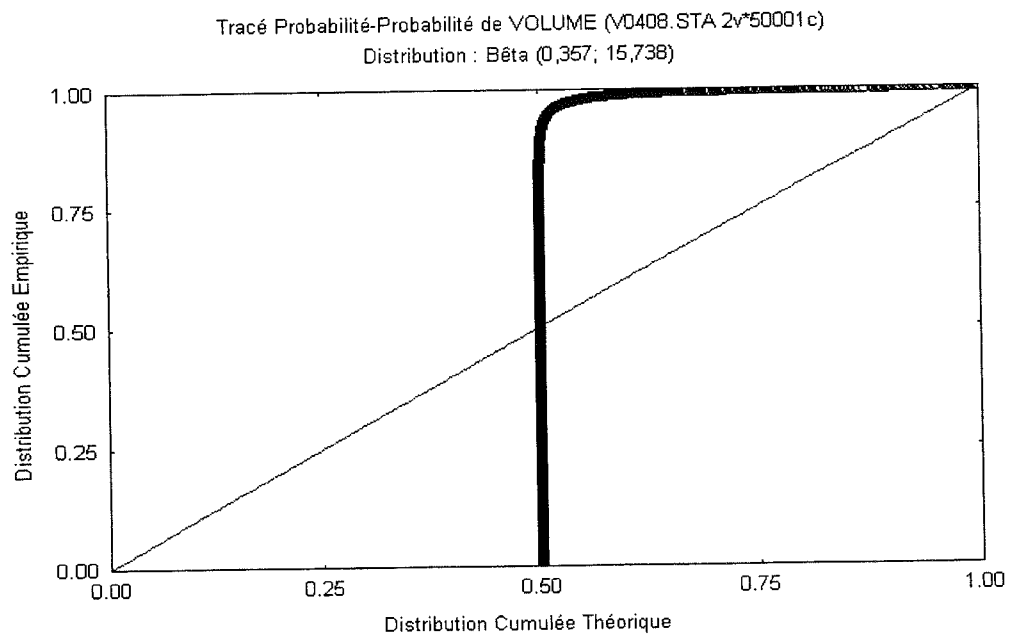


FIG. 79.— Tentative d'ajustement de la distribution des volumes dans le processus A par une loi bêta. Diagramme P-P. 50001 blocs.

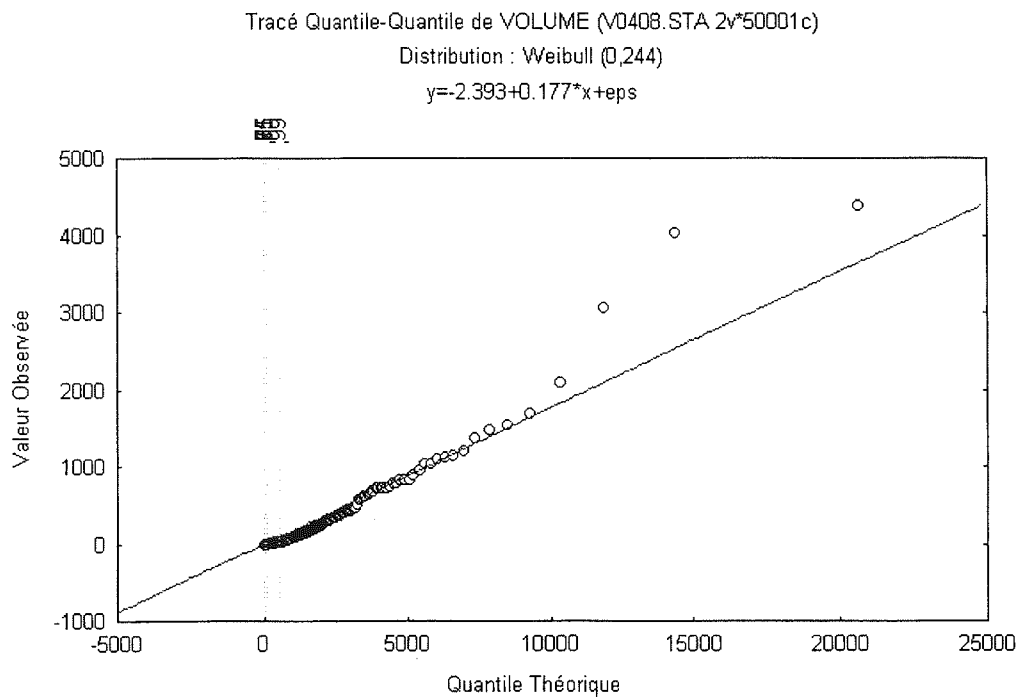


FIG. 80. – Ajustement de la distribution des volumes dans le processus A sur une loi de Weibull. Diagramme Q-Q. 50001 blocs.

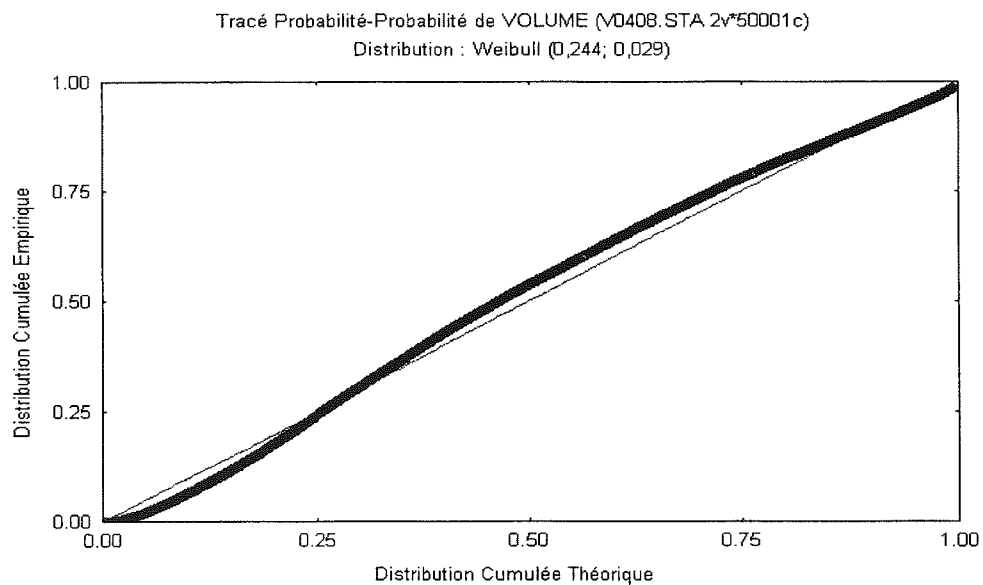


FIG. 81. – Ajustement de la distribution des volumes dans le processus A sur une loi de Weibull. Diagramme P-P. 50001 blocs.

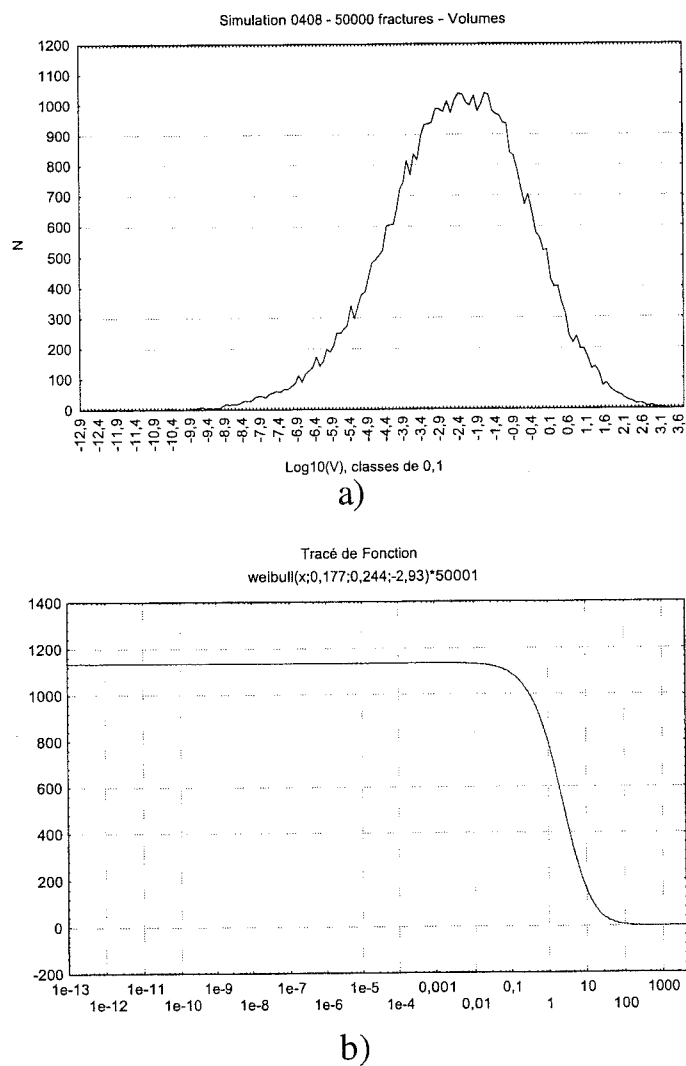


FIG. 82.— Scénario A. 50001 blocs. a) Distribution des volumes de blocs ; b) Fonction de Weibull utilisée pour l'ajustement.

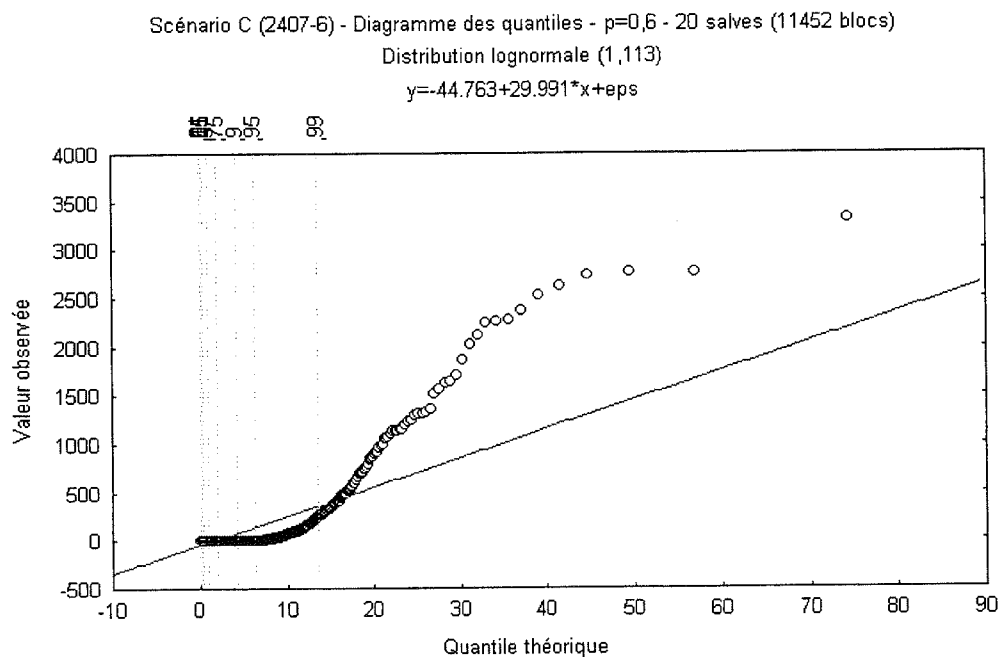


FIG. 83.— Diagramme des quantiles de la distribution des volumes des blocs, pour un ajustement sur une loi lognormale. Scénario C, $p=0,6$, 20 salves (11452 blocs).

D - Distribution des volumes dans le processus C

Nous avons vu plus haut que ce type de processus montre pour les volumes supra-modaux, une loi puissance (fig. 69). Parmi les différentes lois testées citées ci-dessus, aucune n'a permis de résultat correct.

En particulier, la loi lognormale n'est pas représentative (fig. 83), la loi bêta non plus (fig. 84).

E - Distribution des volumes dans le processus D

La loi lognormale décrit assez bien le processus (fig. 85).

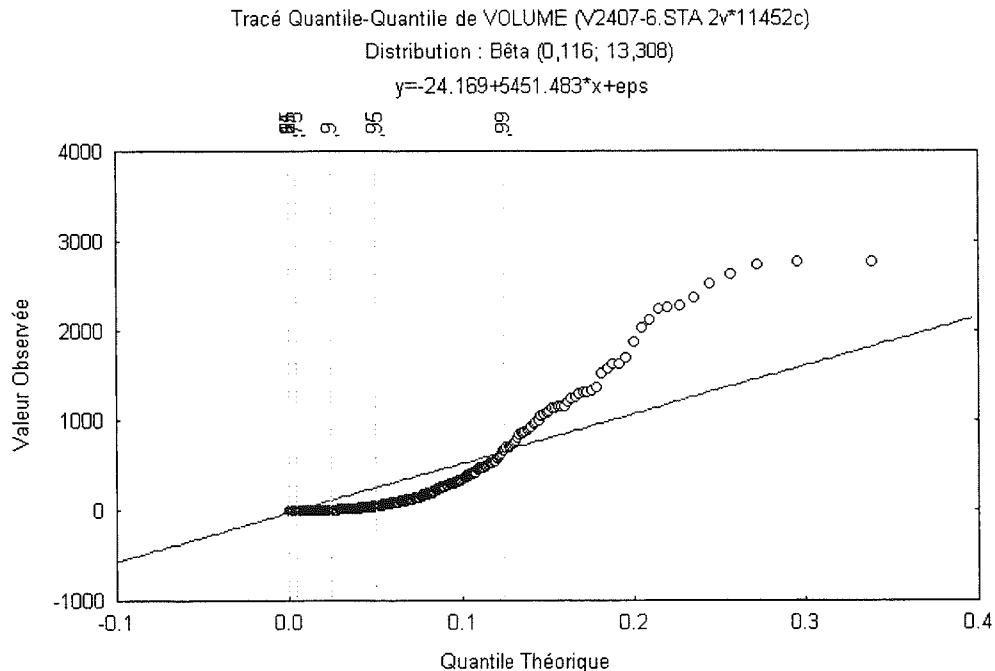


FIG. 84.- Diagramme Q-Q de distribution des volumes des blocs, pour un ajustement sur une loi Beta. Scénario C, $p=0,6$, 20 salves (11452 blocs).

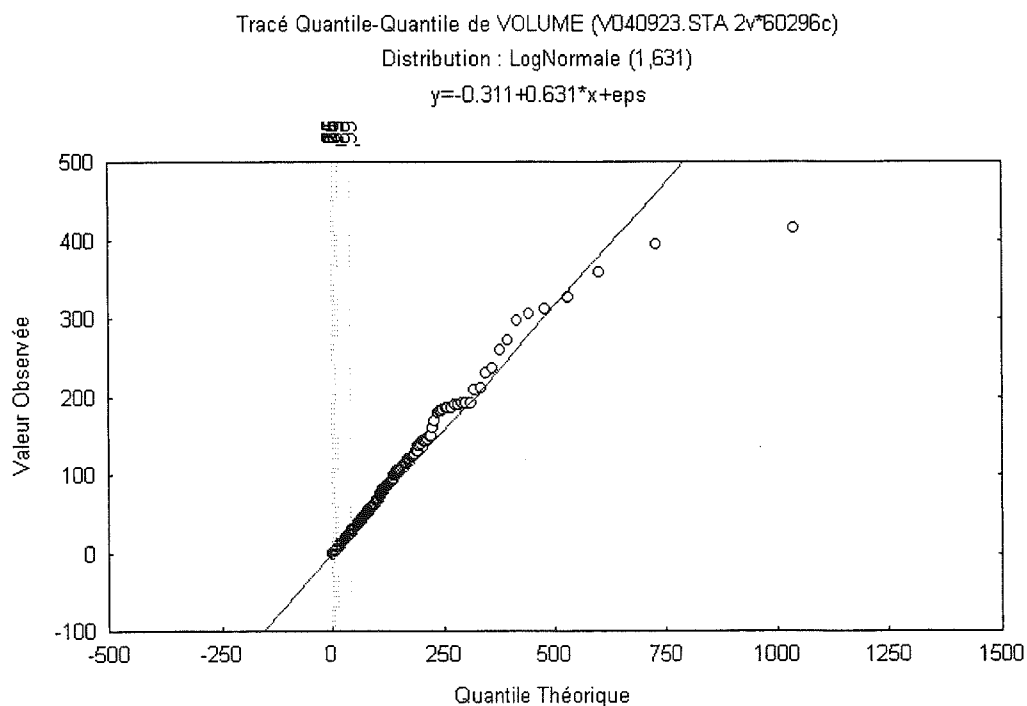


FIG. 85.- Diagramme des quantiles de la distribution des volumes des blocs, pour un ajustement sur une loi lognormale. Scénario D, $p=0,8$, 24 salves (60296 blocs).

On obtient pour une probabilité $p=0,8$ et 24 salves :
 $\sigma = 1,631$, $\mu = 0,631$, $\theta = -0,311$

L'ajustement par une loi de Weibull ne donne pas de résultat concluant.

2.3.2.2. Evolution de la loi de distribution des volumes avec le mécanisme de génération des fractures

Le modèle permettant de garder les états intermédiaires, il a été possible d'étudier la distribution du volume des blocs élémentaires correspondant à différents stades de fracturation, ceci pour les 4 scénarios envisagés (fig. 86 à 89). Compte tenu du fait que les fractures ne divisent que des blocs élémentaires (c'est-à-dire non composés eux-mêmes de blocs), le nombre de fractures est toujours inférieur de 1 au nombre de blocs.

- Processus B

Le choix spatialement aléatoire des germes dans le processus B explique que les courbes obtenues à

différents stades ne présentent aucune portion commune pour les plus gros volumes : la division intervient uniformément sur l'ensemble du domaine à fracturer.

Pour chaque simulation du scénario B, le volume le plus représenté V_{mod} des blocs obtenus est proportionnel au nombre N de fractures générées :

$$V_{mod} = K.N, \text{ avec } K \approx 9 \quad (\text{II.24})$$

De telles évolutions ont été mises en évidence dans des conditions de fracturation *in situ* [Villemin *et al.*, 1999]. Notons cependant qu'il s'agit dans ce cas d'études sur les distributions de longueurs dans un cas où le système de fractures est encore loin de la connexion totale.

- Processus A et D

Dans ces cas, le choix aléatoire du bloc à fracturer fait qu'on observe une persistance, au cours de l'évolution de la fracturation, de la forme de la distribution pour les volumes les plus gros (fig. 87 et 88). Ces deux types de processus donnent des résultats par ailleurs très comparables.

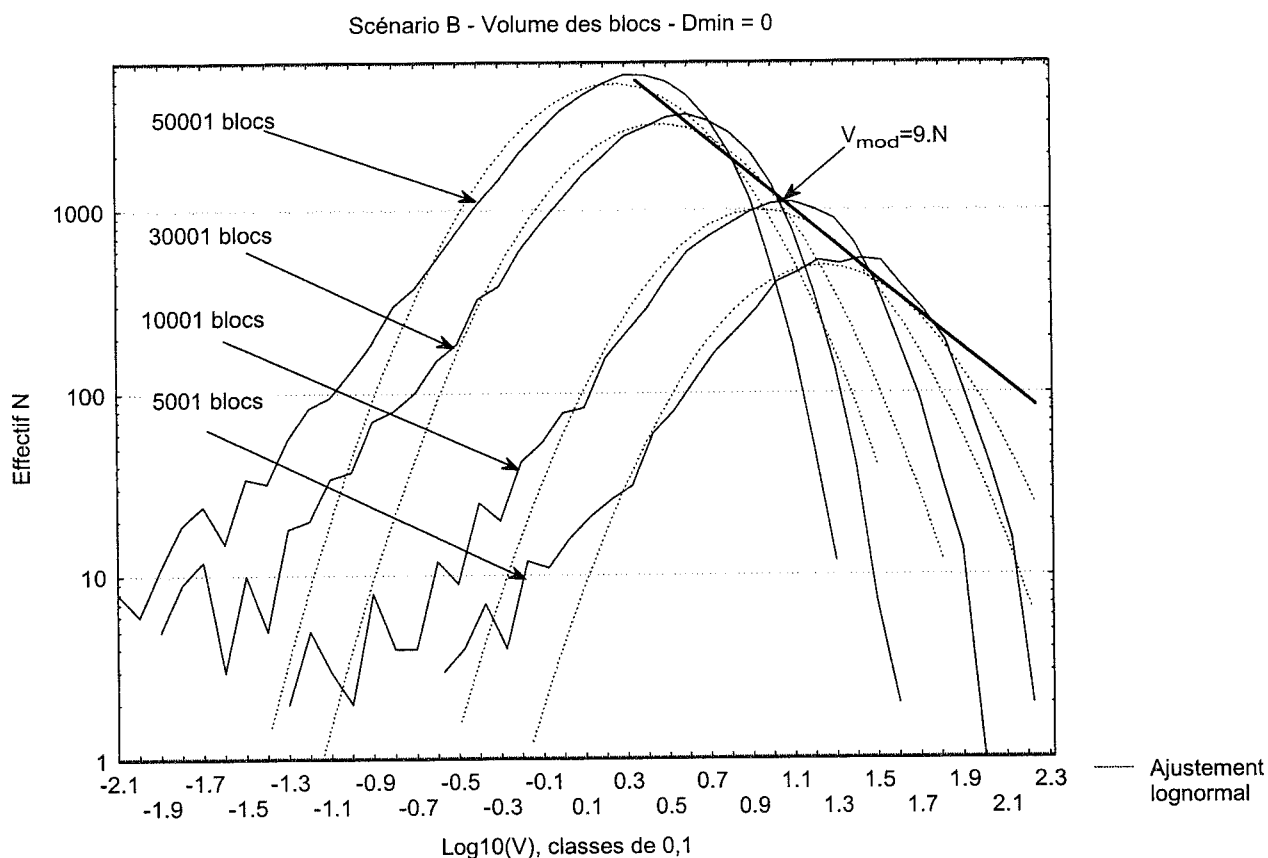


FIG. 86.- Scénario de découpage B. Distribution des volumes des blocs élémentaires à différents stades d'évolution du modèle. Effectif en fonction du logarithme naturel du volume.

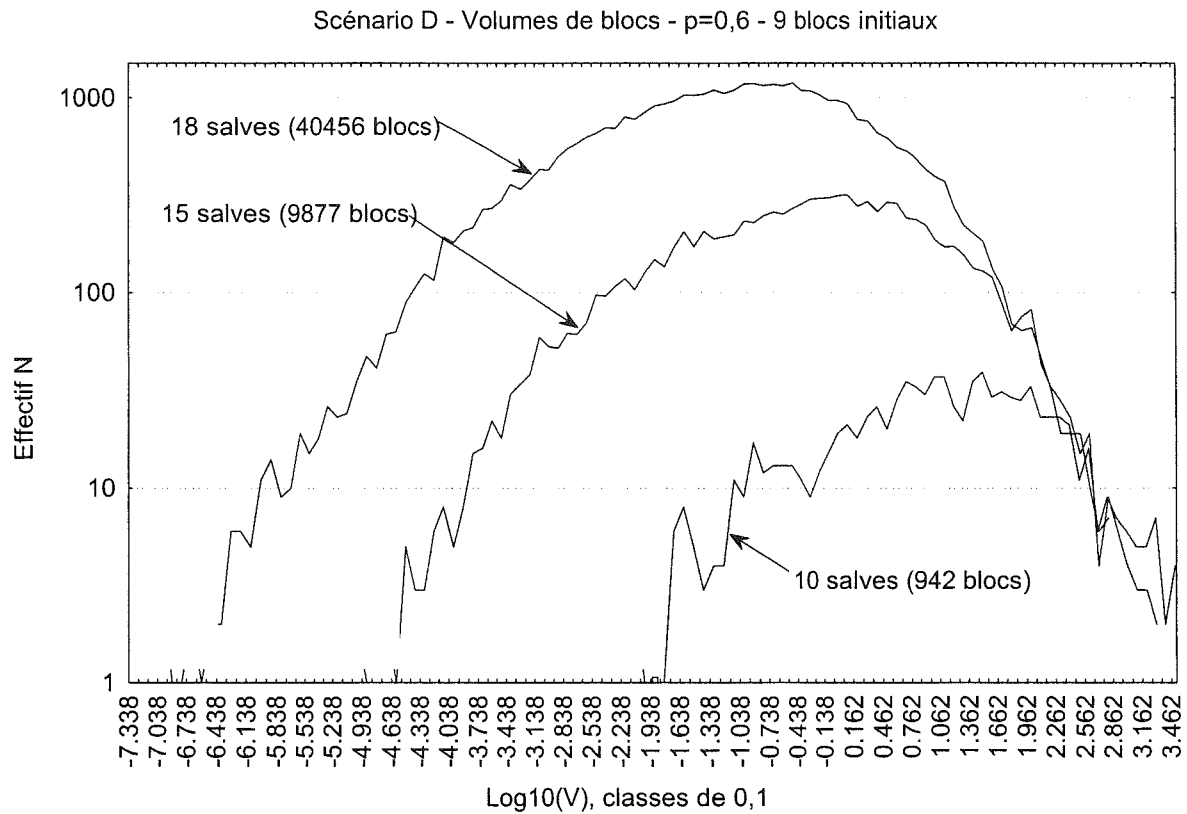


FIG. 87.- Scénario de découpage D. Distribution des volumes des blocs élémentaires à différents stades d'évolution du modèle.

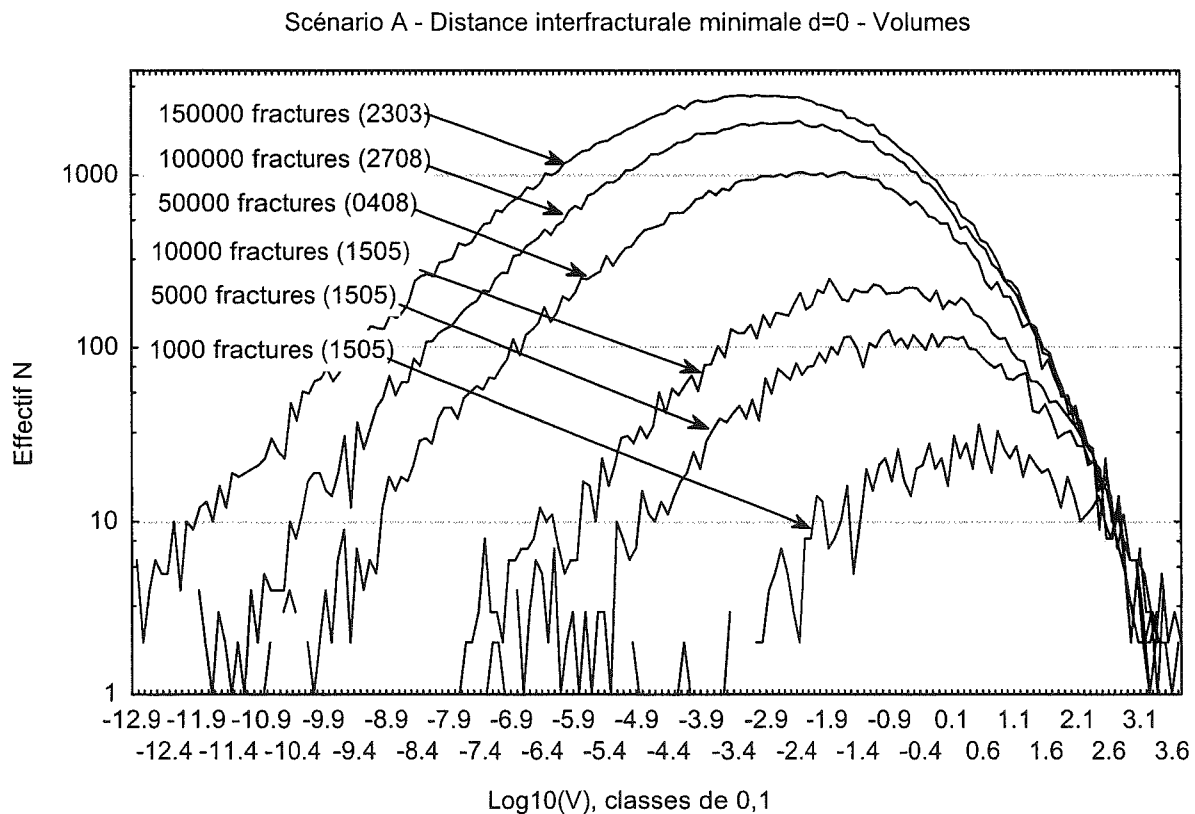


FIG. 88.- Scénario de découpage A. Distribution des volumes des blocs élémentaires à différents stades d'évolution du modèle.

- Processus C

Le processus de nature fractale appliqué dans le scénario C provoque l'apparition, sur la partie centrale de la distribution des volumes, d'une loi puissance (fig. 89). Pour une probabilité de division du bloc de 0,6 cette loi est observable au-delà de 5 salves et persiste au cours de l'évolution du processus (9 ordres de grandeur au bout de 30 salves). La pente de la droite obtenue en coordonnées bilogarithmiques est :

$$p \approx -0,24 \quad (\text{II.25})$$

Si l'on pose

$$R = \sqrt[3]{V}$$

R est nommée dimension linéaire du bloc de volume V.

Le tracé du graphe de distribution $N=f(R)$ (fig. 90) montre une loi puissance dont la pente est :

$$p' = 3, p \approx 0,7 \quad (\text{II.26})$$

La linéarité existe sur 3 ordres de grandeur.

2.3.2.3. Scénarios A et B : influence de la distance interfracturale minimale

L'ajout d'une contrainte relative à la distance entre fractures, par le biais de la notion de distance interfracturale minimale Δ_F (cf. *supra*) a été étudié sur les processus A et B. On conçoit que la mise en jeu de ce paramètre a une influence d'emblée plus importante dans le processus A, qui favorise la génération de petits blocs dès le début du mécanisme, que dans le processus B, pour lequel la contrainte n'entrera en vigueur qu'à l'approche de la saturation définie plus haut. On conçoit également que cet état de saturation soit similaire, du point de vue de la distribution des volumes, dans les deux processus A et B.

On peut tenter d'établir une relation entre les valeurs du volume minimal et la distance Δ_F à l'état de saturation (fig. 91).

Nous pouvons également estimer la sphéricité des blocs, en calculant le diamètre d_{sph} de la sphère de même volume V_{min} que le bloc, puis en comparant la valeur de diamètre obtenue à la distance interfracturale Δ_F .

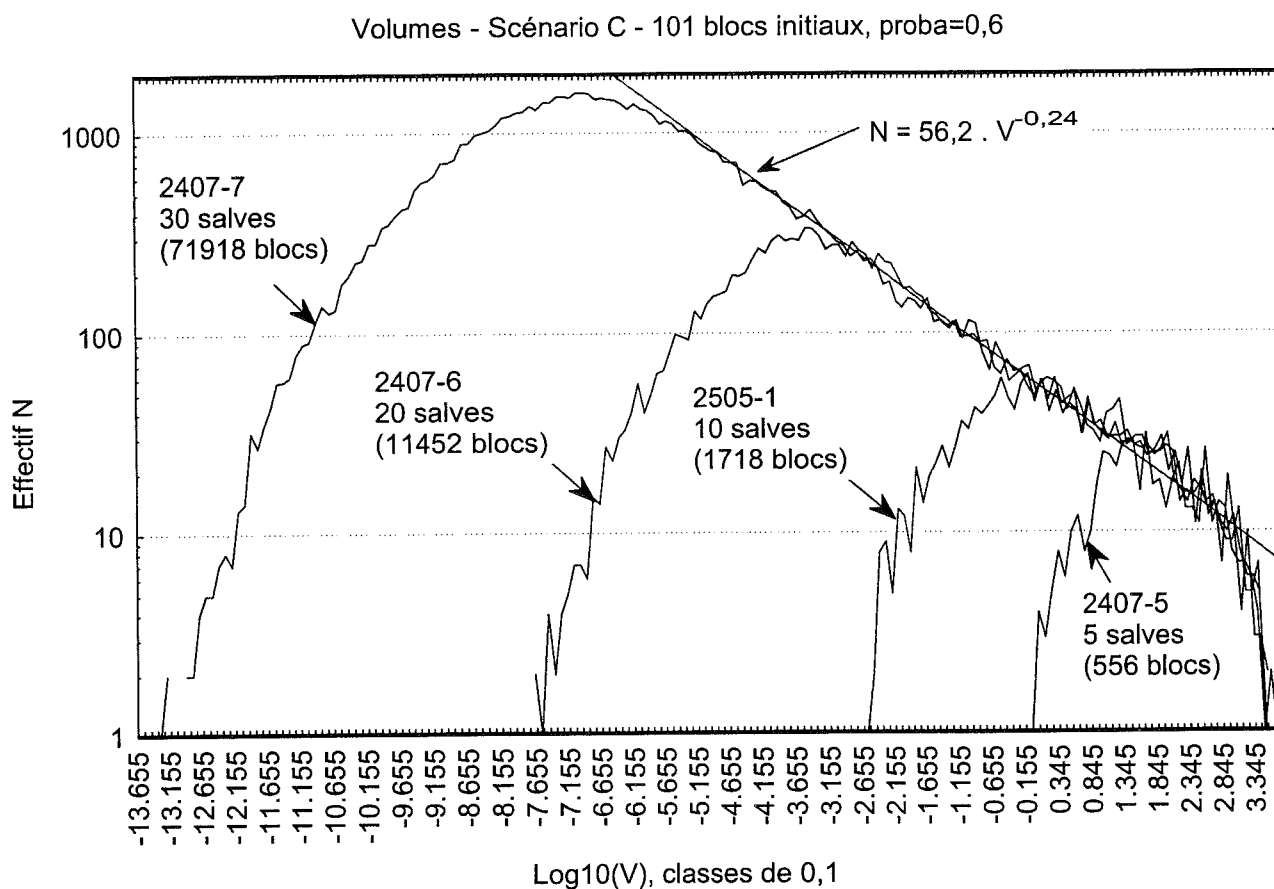


FIG. 89.- Scénario de découpage C. Distribution des volumes des blocs élémentaires à différents stades d'évolution du modèle. Effectif en fonction du logarithme naturel du volume.

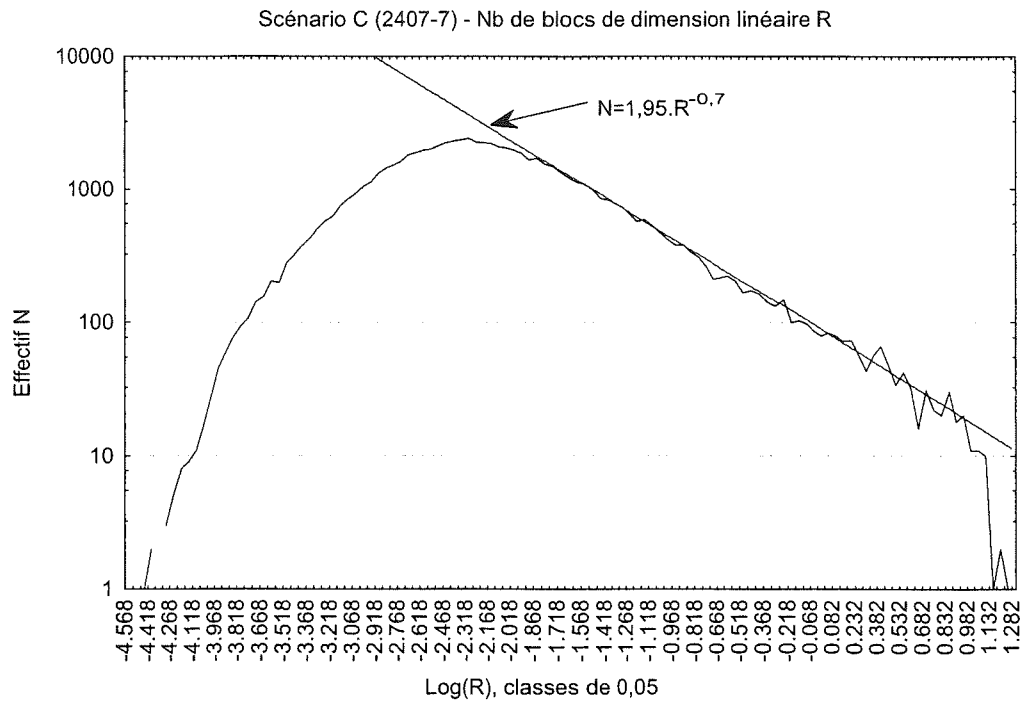


FIG. 90.- Processus de découpage C. Probabilité 0,6. 71918 blocs. Distribution de la dimension linéaire R. On observe une loi puissance sur 3 ordres de grandeur.

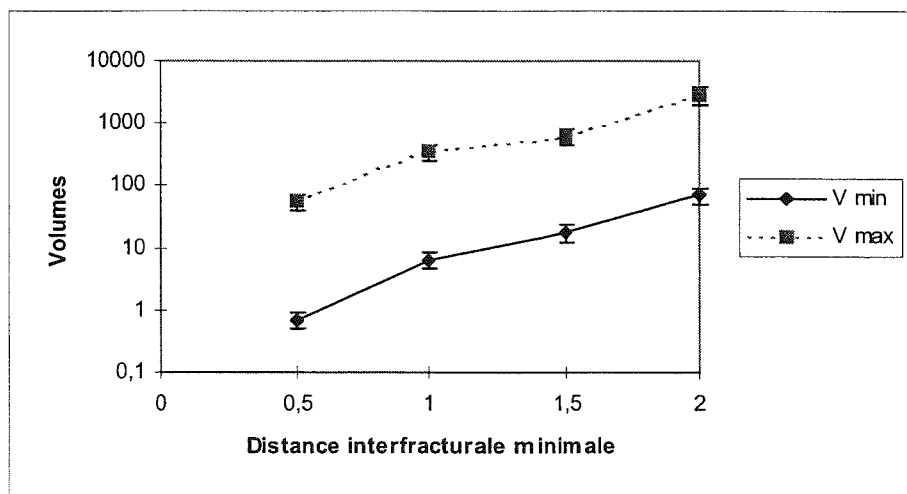


FIG. 91.- Volumes minimaux et maximaux des blocs obtenus à saturation dans les processus A et B, pour des valeurs variables de la distance interfracturale Δ_F .

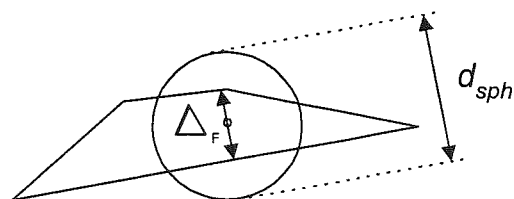


FIG. 93.- Illustration en 2D du résultat obtenu ci-dessus. Cas d'un bloc produit par l'imposition d'une distance interfracture minimale Δ_F . Le diamètre de la sphère de même volume que le bloc est $d_{sph} \approx 2.\Delta_F$.

En calculant

$$d_{sph} = 2 \sqrt[3]{\frac{3 \cdot V_{min}}{4\pi}}, \text{ on obtient (fig. 92) :}$$

Δ_F	V_{min}	d_{sph}
0,5	0,7	1,10
1,0	6,4	2,30
1,5	17,9	3,24
2,0	69,6	5,10

FIG. 92.- Valeurs du diamètre de la sphère de même volume que le bloc minimal, permettant d'estimer la sphéricité des blocs, pour différentes valeurs de la distance interfracturale Δ_F .

On constate que, sur l'intervalle de distance interfracturale considéré, le diamètre de la sphère de même volume que le bloc minimal croît linéairement avec Δ_F et on a : $d_{sph} \approx 2 \cdot \Delta_F$ (II.27)

En première approximation, on peut donc dire que la sphéricité, quasiment constante dans cet intervalle de Δ_F est relativement mauvaise (fig. 93).

Comme le montre la figure 94, la variation du paramètre Δ_F dans les processus de type B conserve la valeur du mode, puisque cette valeur ne dépend que du nombre de fractures créées. Par ailleurs, la distribution

des volumes les plus importants est inchangée : la partie droite des courbes est inchangée.

En résumé, dans le processus B, l'introduction d'une valeur Δ_F entraîne une disparition des petits blocs en resserrant la distribution par sa moitié gauche. L'effet de Δ_F devient significatif sur les diagrammes de distributions, aussi bien que sur les coupes dans le modèle pour une valeur de Δ_F voisine de 1, soit 1/50ème de l'arête du cube (fig. 94).

Dans le processus de type A au contraire, la valeur modale varie avec Δ_F (fig. 95). Ceci traduit indirectement le rejet, précoce dans le processus A, des fractures visant à générer des blocs de volume trop petit.

Les simulations de type A faites avec une distance interfracturale minimale Δ_F nulle ne montrent pas de lois puissance (fig. 88). En revanche, on observe, lorsque Δ_F augmente, l'apparition d'une loi puissance pour les valeurs supramodales (fig. 96a et 96b). L'exposant de ces lois puissance varie entre -0,5 et -0,9 sur le domaine de variation du nombre total de blocs et de D_F étudié. Lorsque le nombre de fractures augmente, D_F restant constant, l'exposant croît en valeur absolue. A nombre de fractures égal, l'exposant augmente en valeur absolue lorsque D_F augmente. Il vaut 0,85 pour 10000 fractures pour $D_F=0,5$ (fig. 96b) alors qu'il est inférieur à 0,5 pour $D_F=0,1$ (fig. 96a).

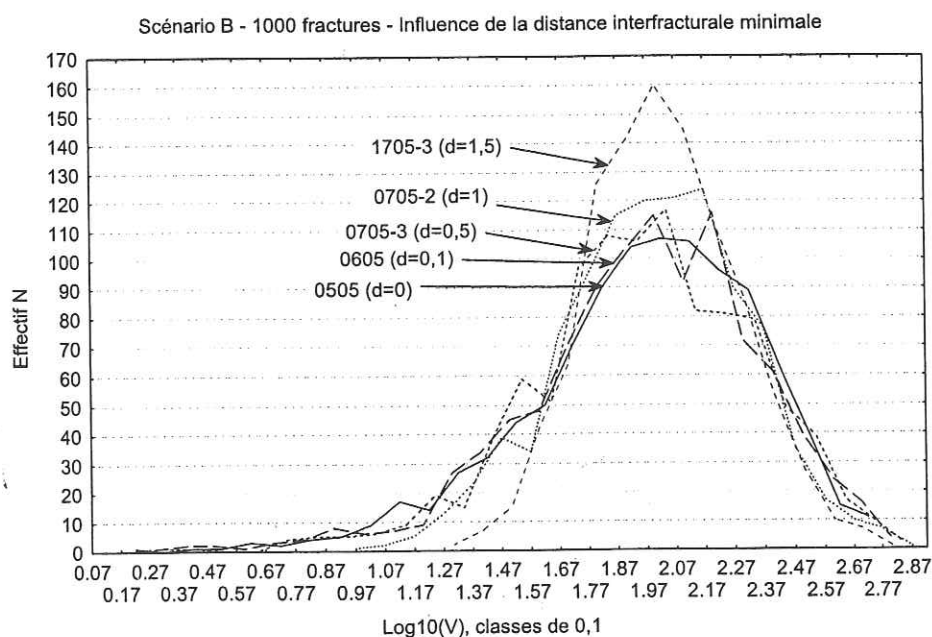


FIG. 94.- Scénario B. Influence de la distance interfracturale minimale sur la distribution des volumes, pour 1000 fractures générées.

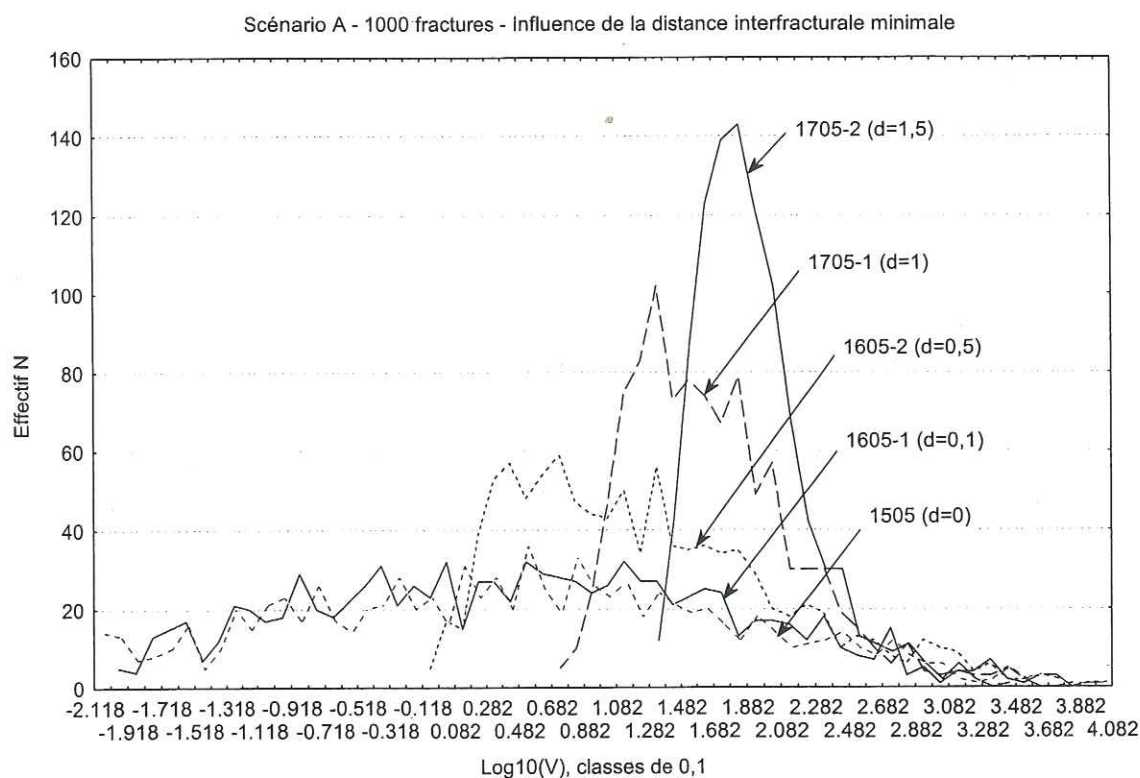


FIG. 95.— Scénario A. Influence de la distance interfracturale minimale sur la distribution des volumes, pour 1000 fractures générées.

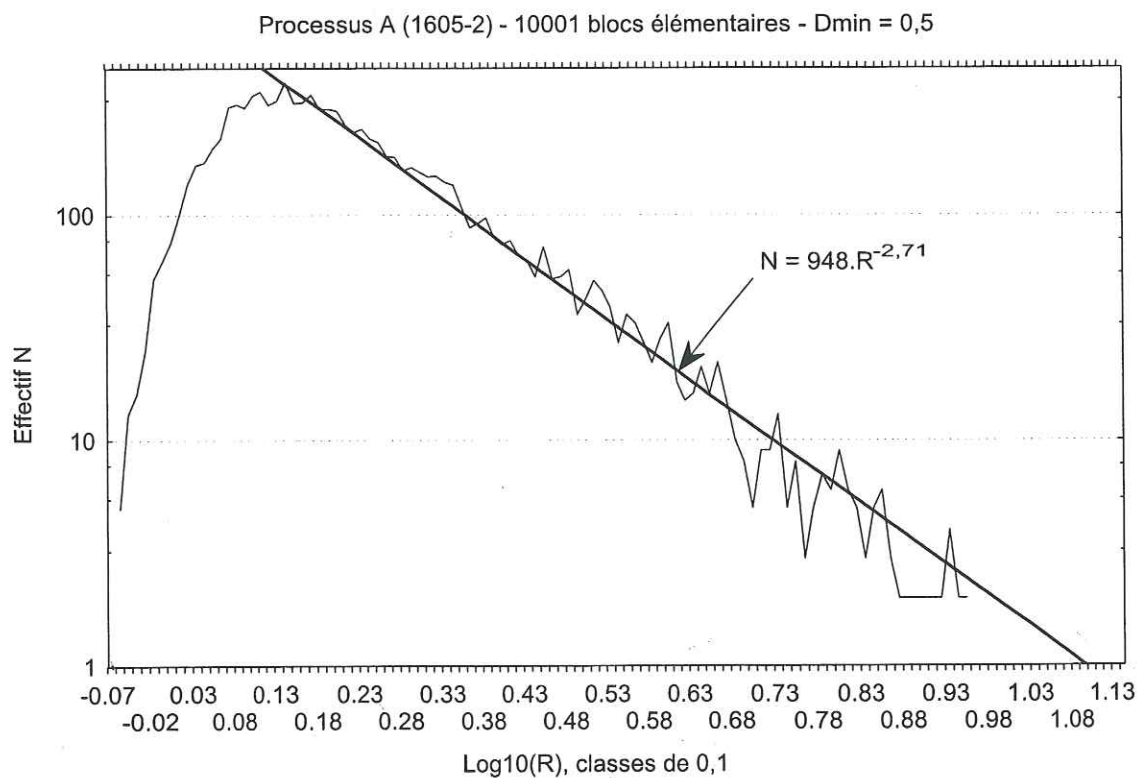
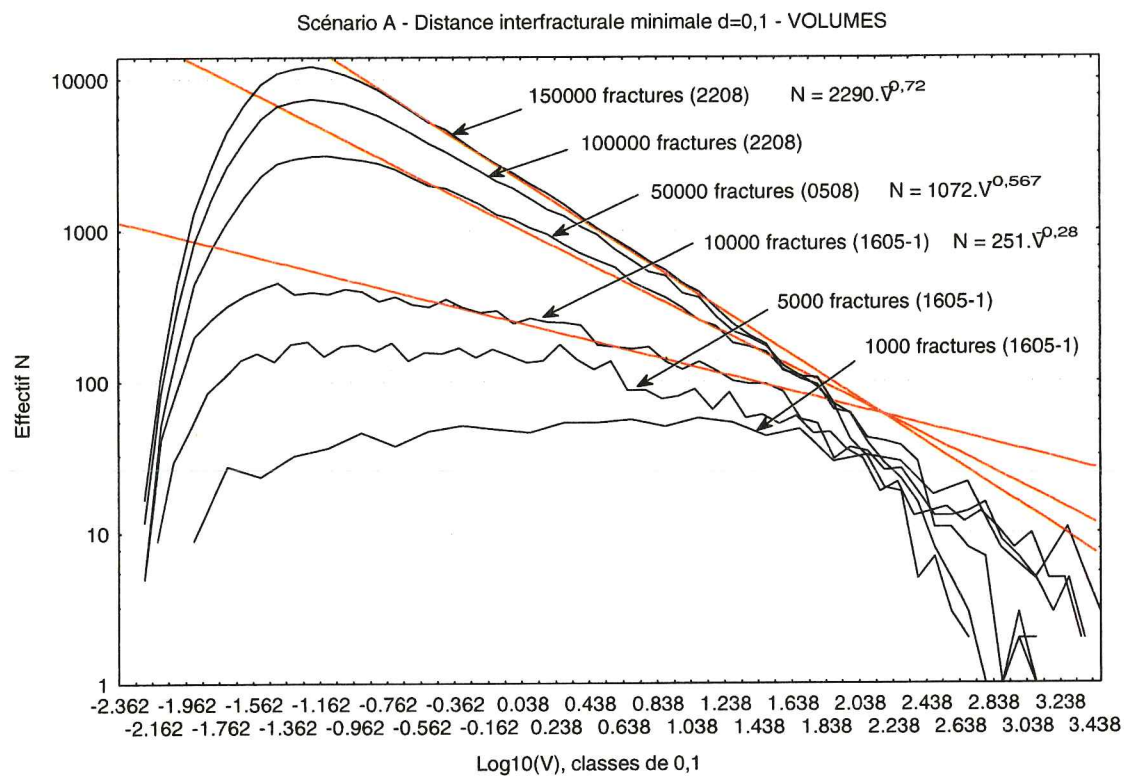
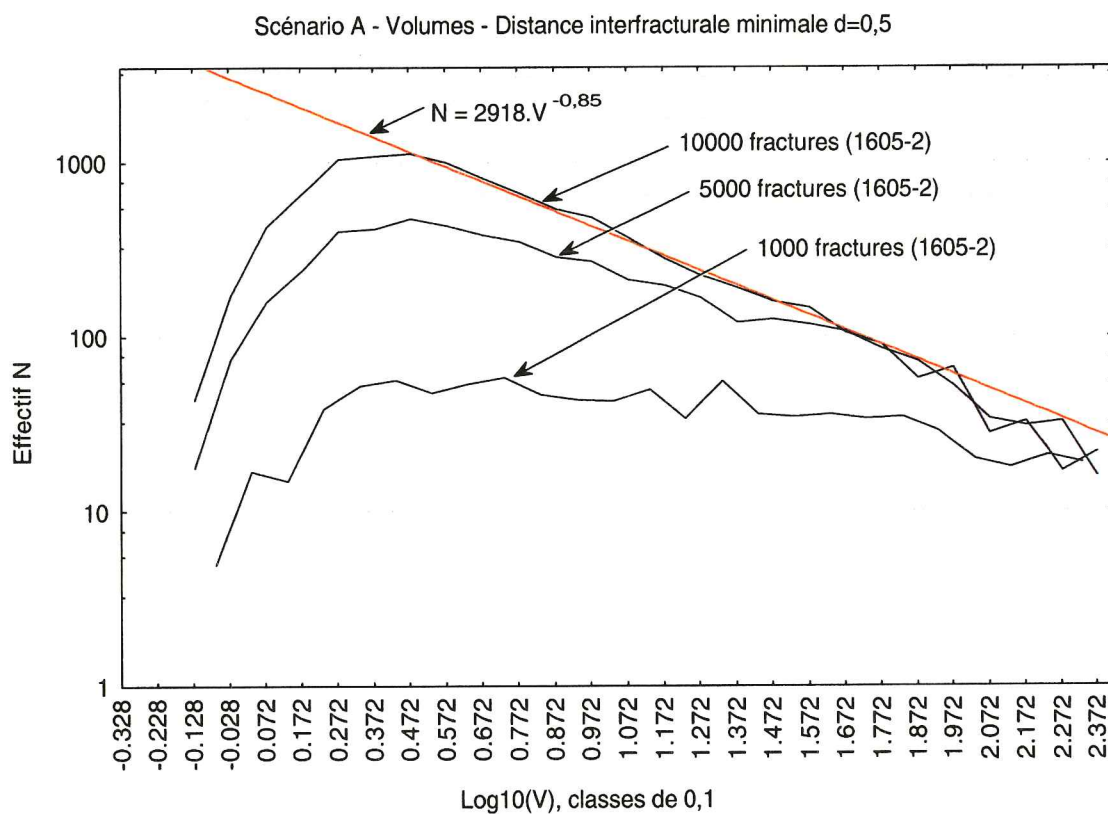


FIG. 97.— Processus A. 10000 blocs (saturation non atteinte). Distribution de la valeur R, racine cubique du volume. Distance interfracturale minimale de 0,5. La pente de la droite donne la dimension fractale, $D=2,71$.



a)



b)

FIG. 96.- Scénario A. Distribution des volumes pour une distance interfracturale de a) 0,1 et b) 0,5.

En représentant les valeurs de N en fonction de $R = \sqrt[3]{V}$ (fig. 97), on obtient la dimension fractale correspondante. Cette valeur est de l'ordre de 2,2 pour $D_F=0,1$ et 150000 blocs. Elle est d'environ 2,7 pour $D_F=0,5$ et 10000 blocs.

2.3.2.4. Scénarios C et D :

influence de la probabilité de division d'un bloc

Les scénarios C et D sont caractérisés par l'existence d'un paramètre supplémentaire par rapport aux scénarios A et B. Il s'agit de la probabilité p de division d'un bloc qui est constante au cours du processus. Nous avons cherché à qualifier l'influence de ce paramètre.

La figure 98 présente l'influence d'une variation de la valeur de la probabilité de division du bloc sur la distribution des volumes des blocs élémentaires produits dans le processus D. La remise en jeu des blocs dans le mécanisme fait que globalement, le volume le plus probable n'évolue pas, ni avec la probabilité, ni avec l'avancement du découpage.

La distribution des volumes dans les simulations produites par le scénario C montrent une linéarité en coordonnées bilogarithmiques pour les valeurs supra-modales (fig. 89 et 100). La pente correspondante a varie avec la probabilité p . A un stade donné i , le nombre de blocs N_i de volume V_i satisfait :

$$N_i = K \cdot (V_i)^a, \text{ a réel} \quad (\text{II.28})$$

soit, si r_i représente le diamètre de la sphère de même volume V_i que le bloc :

$$N_i = K \cdot (r_i)^{3a} \quad (\text{II.29})$$

Par analogie avec la définition du processus fractal :

$$N_i = K \cdot (r_i)^{-D} \quad (\text{II.30})$$

on trouve la dimension fractale De obtenue expérimentalement dans notre processus :

$$De = -3a \quad (\text{II.31})$$

Dans le processus de fragmentation de Turcotte [1986] et Allègre [1982], N_i et N_{i+1} étant les nombres d'éléments de dimension linéaire respectives r_i et r_{i+1} , on a :

$$\begin{aligned} N_i &= C \cdot r_i^{-Dt} \\ N_{i+1} &= C \cdot r_{i+1}^{-Dt} \end{aligned} \quad (\text{II.32})$$

ce qui permet d'obtenir la dimension fractale théorique Dt :

$$Dt = \frac{\log \frac{N_{i+1}}{N_i}}{\log \frac{r_i}{r_{i+1}}} \quad (\text{II.33})$$

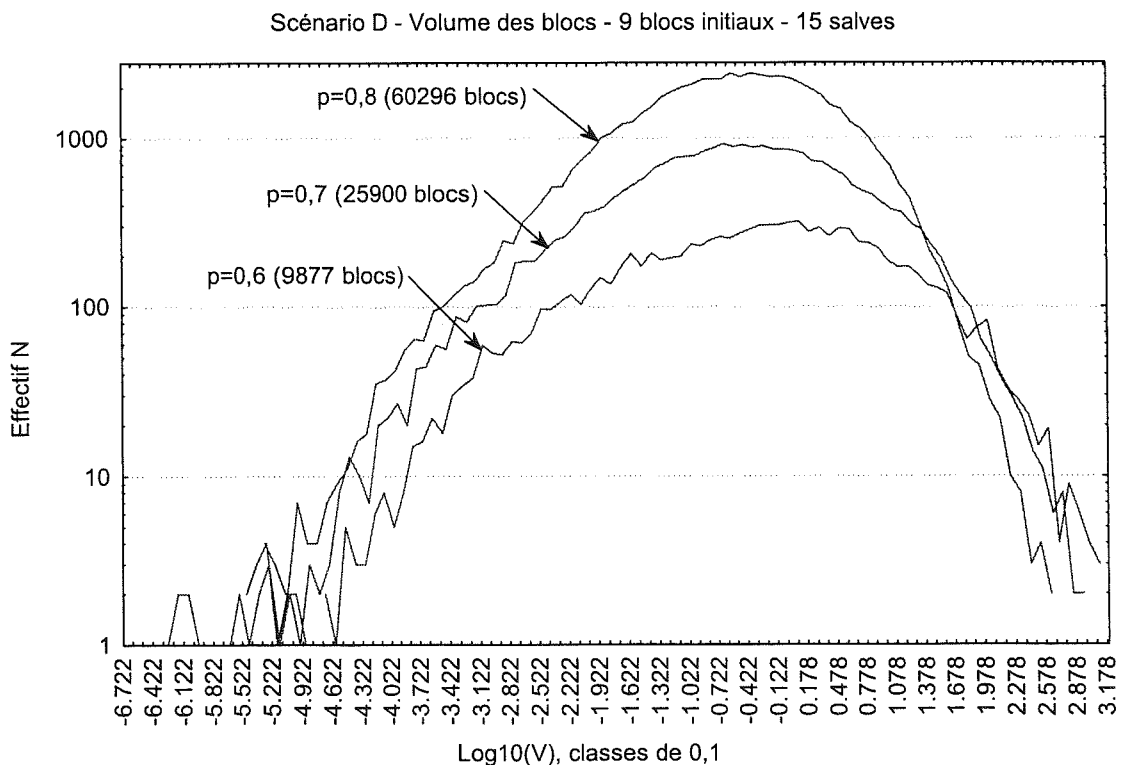


FIG. 98.- Scénario de découpage D. Distribution des volumes des blocs élémentaires à partir d'un état initial de 9 blocs, pour 15 salves de fractures et différentes valeurs de probabilités.

En appliquant cette formule à notre cas (fig. 53), on a $\frac{N_{i+1}}{N_i} = 2p$, où p est la probabilité de division d'un bloc. Par ailleurs, en considérant, en première approximation, que chaque bloc est divisé en 2 blocs de même volume, on a :

$$\frac{r_i}{r_{i+1}} = 2^{1/3} \quad (\text{II.34})$$

$$\text{d'où : } Dt = \frac{3 \cdot \log(2p)}{\log 2} \quad (\text{II.35})$$

Des simulations ont été réalisées pour un nombre de salves suffisamment grand pour minimiser l'incertitude sur la mesure de la pente (fig. 89). On obtient ainsi les valeurs suivantes des dimensions fractales (fig. 99) :

p	pente a	De	Dt
0,5	0	0	0
0,6	-0,24	0,72	0,79
0,7	-0,5	1,5	1,46
0,8	-0,7	2,1	2,03
1	-1,08	3,24	3

FIG. 99. – Comparaison des dimensions fractales théoriques Dt et expérimentales De obtenues dans le scénario de découpage C.

Les valeurs expérimentales sont pour la plupart légèrement supérieures aux valeurs théoriques. Ceci peut s'expliquer par le nombre encore souvent insuffisant de salves (particulièrement dans le cas $p=1$ par exemple).

Le processus plus avancé (cas $p=0,5$) (fig. 89) ($p=0,6$) montre une bonne convergence vers les valeurs théoriques. Remarquons cependant que la validité de cette comparaison des dimensions obtenues est nécessairement limitée. En effet, l'hypothèse que nous faisons d'une division produisant des blocs de même volume est fortement simplificatrice.

Pour $p=0,5$, on obtient une pente nulle : le nombre de nouveaux blocs créés à chaque étape est constant, et on ajoute au système des blocs de taille toujours plus petite (fig. 100).

Il faut remarquer que pour les valeurs de p inférieures à 0,5, la partie droite de la courbe correspond à l'état de découpage initial. Cette partie ne montre pas de loi puissance ; on n'a donc pas de processus fractal. Le processus tend à s'arrêter d'autant plus rapidement que la probabilité de fragmentation est faible (fig. 101).

Lorsque la probabilité p est fixée à 1, à chaque stade, on divise tous les blocs. Ce cas extrême est dépourvu de signification dans le milieu naturel.

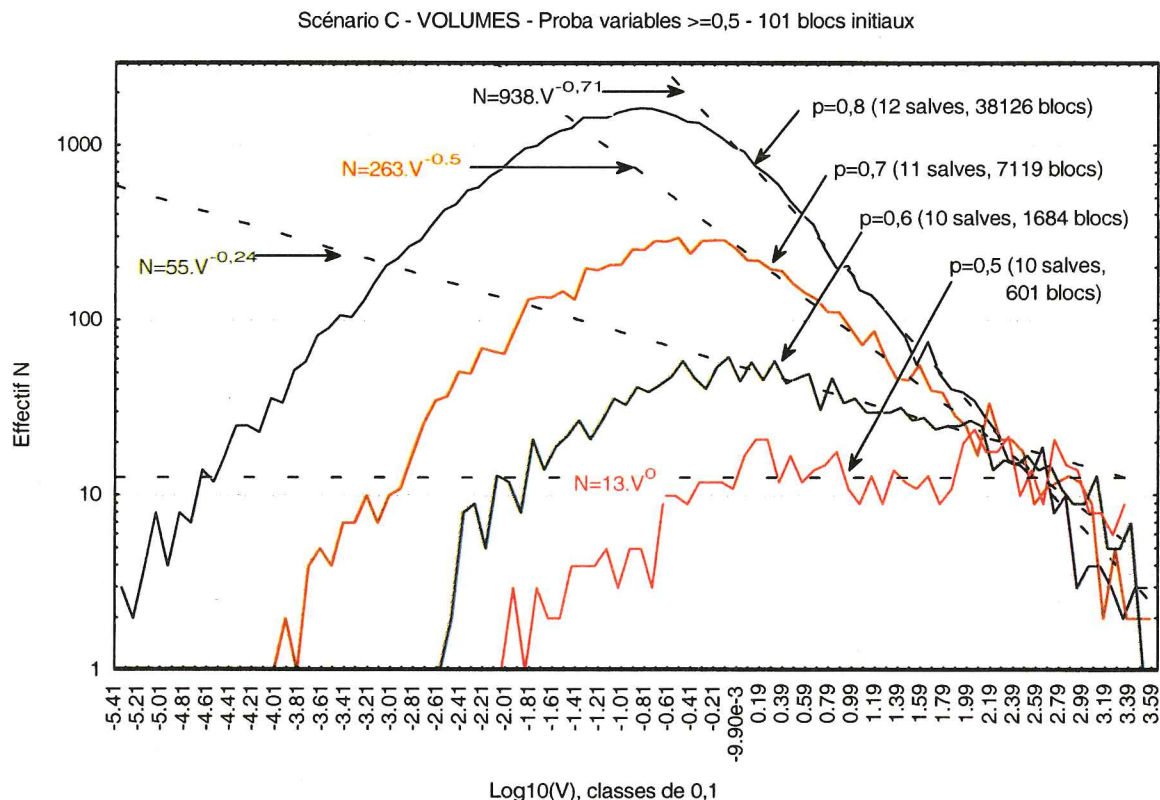


FIG. 100. – Scénario de découpage C. Distribution des volumes des blocs élémentaires à partir d'un état initial de 101 blocs, pour une probabilité variable supérieure ou égale à 0,5.

2.3.2.5. Conclusion

La conception de notre modèle permet l'étude de la distribution des volumes des blocs générés par fracturation. Nous avons envisagé quatre processus de découpage qui engendrent des distributions statistiques de volumes sensiblement distinctes. Nous pouvons classer les distributions obtenues en deux grands types.

Les scénarios de découpage B et D engendrent des lois lognormales. Ce résultat est à relier à l'existence d'une composante stochastique forte dans le mécanisme de tirage du bloc à découper. En effet, dans le cas B, la position du germe de fracture est aléatoire dans l'enceinte du modèle, et dans le cas D, le phénomène de remise en jeu des blocs déjà divisés a un effet similaire.

A l'inverse, les scénarios A et C ne suivent pas la loi lognormale.

Dans le scénario C, une loi puissance est imposée par la construction même du processus. Nous avons relié cette loi puissance à la probabilité de fragmentation, avec une bonne convergence vers les valeurs théoriques. La dimension fractale brute obtenue s'échelonne entre 0 pour $p=0,5$ et 3 pour $p=1$.

Dans le processus A, le tirage aléatoire du bloc à diviser a pour conséquence la division de blocs de taille toujours plus petite, et donc de rendre de plus en plus probable l'exclusion des grands blocs. Nous avons

observé deux comportements différents pour ce processus de fragmentation, selon l'existence ou non d'une distance interfracturale minimale imposée D_F . Pour $D_F = 0$, les volumes supra-modaux sont distribués selon une loi de Weibull. Mais en augmentant cette distance interfracturale minimale, on voit apparaître, dans les distributions de volumes de type A, une loi puissance. La dimension fractale obtenue dans les essais effectués varie de 2,2 ($D_F=0,1$ et 150000 fractures dans notre volume cubique de 50 unités de côté) à 2,7 ($D_F=0,5$ et 10000 fractures dans les mêmes conditions).

2.3.3. Lois relevées sur les sections 2D : longueurs de traces de fractures

A partir de simulations réalisées dans une enceinte cubique de 50 unités d'arête et comportant un nombre variable de blocs limités par des fractures d'orientation aléatoire (de 1000 à 150 000), nous avons relevé les longueurs de trace sur des sections dans le modèle. Le nombre de traces de fractures sur chaque section (50 x 50 unités) s'échelonne entre un peu plus d'une centaine, pour 1000 blocs, et il atteint presque 6000 pour 150000 blocs. De façon à obtenir un nombre de longueurs de trace représentatif, nous avons pris en compte plusieurs sections dans chaque simulation. Pour nous assurer de la fiabilité des résultats, nous avons réalisé plusieurs simulations pour chaque jeu de paramètres (nombre de fractures, distance interfracturale minimale, etc...) de valeur donnée.

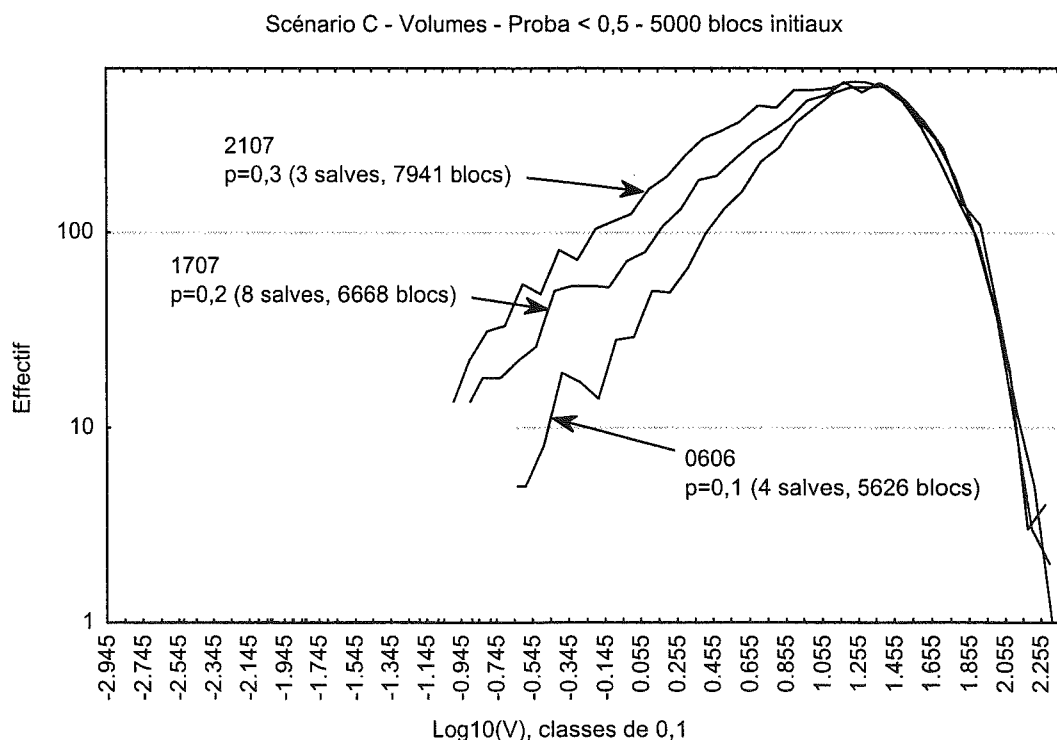


FIG. 101. – Scénario de découpage C. Distribution des volumes des blocs élémentaires à partir d'un état initial de 5000 blocs, pour une probabilité variable inférieure à 0,5. Les distributions ne montrent pas de loi puissance.

2.3.3.1. Caractérisation des distributions de longueurs de traces

Considérons les distributions de longueurs de trace pour les 4 processus et pour un nombre de blocs comparable. L'ensemble des distributions obtenues peut être inscrit dans une enveloppe d'allure pyramidale, et qui correspond à la distribution du découpage de type B (fig. 103). La dispersion des courbes obtenues (fig. 102) est caractérisée par les paramètres σ (écart-type) et c_V (coefficient de dispersion) dont la définition a été donnée au § 2.3.2.1.

	A	B	C	D
\bar{L}	2,3	2,1	4,4	2,3
σ	4,7	2,9	7,8	4,0
c_V	2,1	1,4	1,8	1,7

FIG. 102. – Valeurs de la moyenne \bar{L} , de l'écart-type σ et du coefficient de dispersion c_V pour la distribution des longueurs de traces dans les 4 processus correspondant à la figure 103.

On note que le processus B montre la dispersion la plus faible, le processus A la plus forte, et les scénarios C et D donnent des valeurs intermédiaires. La distribution devient « floue » lorsqu'on s'écarte beaucoup de part et d'autre de la valeur modale (fig. 103). En particulier,

les grandes longueurs de traces sont tronquées par le confinement du volume modélisé (effet de taille finie), occasionnant une chute de la courbe (*fall-off*). Dans notre étude des volumes supramodaux, nous sommes ainsi amenés à exclure les valeurs de longueurs de trace supérieures à 15 unités, le volume modélisé étant un cube de 50 unités d'arête.

A - Distribution des longueurs dans le processus B

On peut ajuster assez bien les paramètres de la loi lognormale sur les distributions de longueurs de trace issues du découpage B (fig. 104). Les ajustements sur les autres lois testées (Weibull, bêta, gamma, Rayleigh) ne sont pas concluants.

Pour les longueurs supérieures à la valeur modale, on observe une linéarité sur le diagramme log-log, traduisant une loi puissance d'exposant $p \approx -2,0$. Cette valeur traduit que le processus tend à générer des traces couvrant tout le plan. Elle est indépendante de la distance interfracturale Δ_F (fig. 103 et 105).

Ce processus de découpage se révèle effectivement peu sensible aux variations du paramètre Δ_F (fig. 106). Cette observation trouve son origine dans le tirage aléatoire du germe : la distance interfracturale imposée Δ_F est inférieure à la taille de maille du réseau dans le modèle.

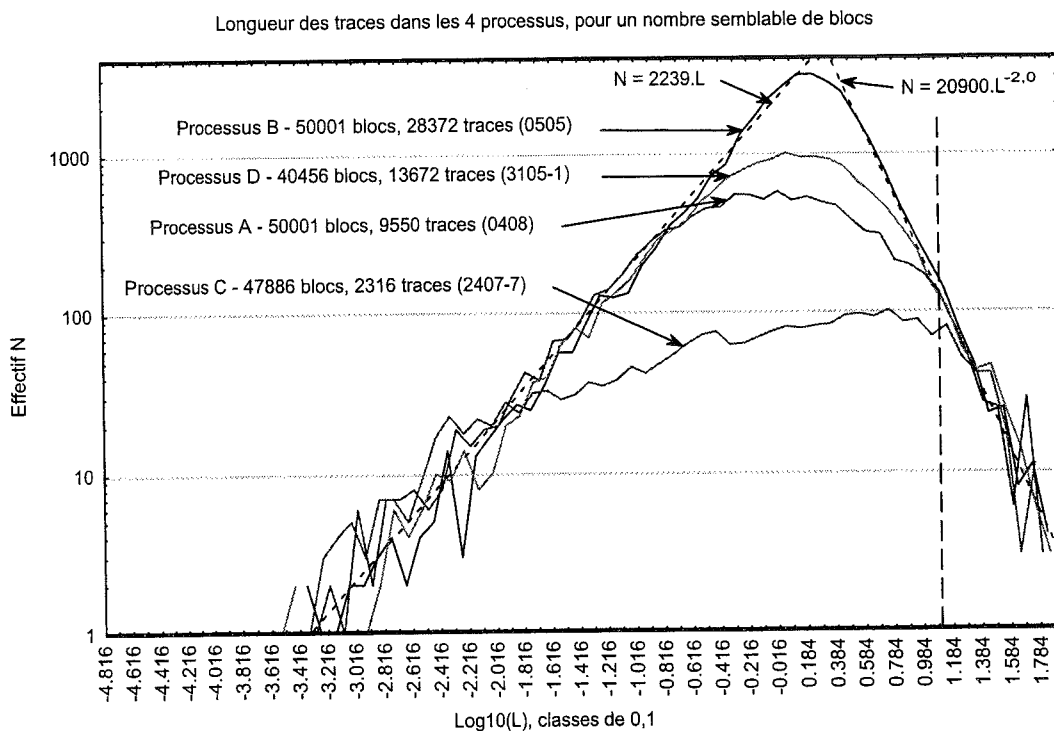


FIG. 103. – Exemple de distributions de la longueur des traces dans les 4 processus. Les processus A et B sont réalisés avec une distance interfracturale minimale $\Delta_F = 0$, et les processus C et D avec une probabilité de division du bloc $p = 0,6$. Les valeurs utiles des distributions sont telles que $L < 15$ environ (trait pointillé).

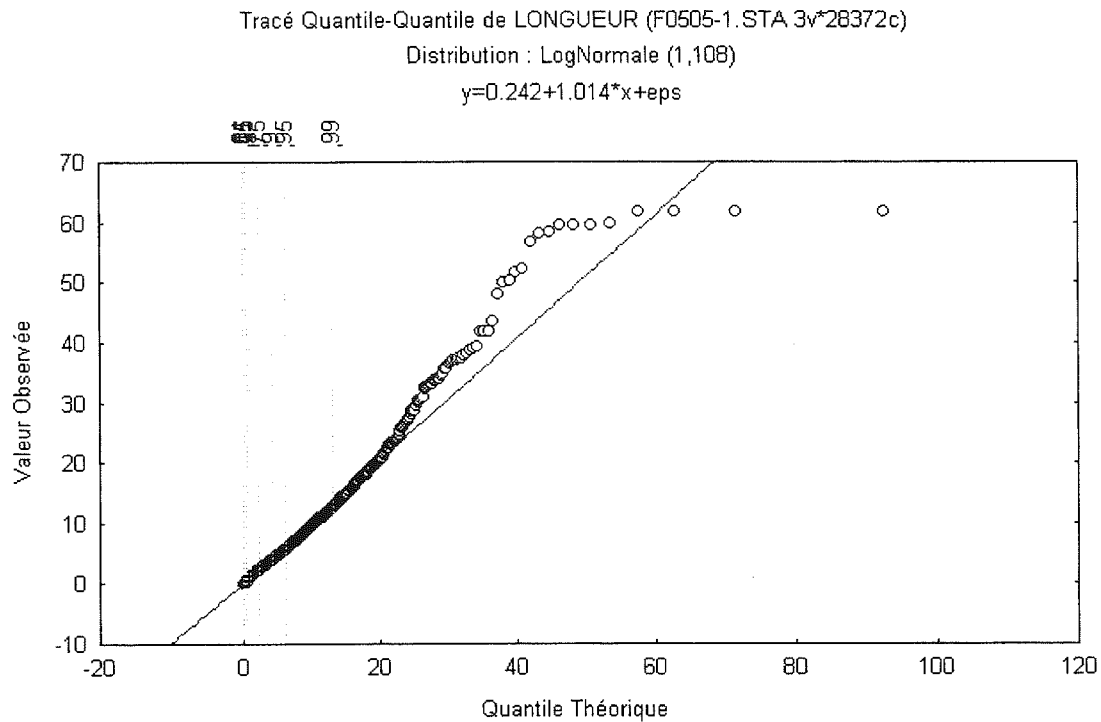


FIG. 104.- Distribution des longueurs de trace dans le découpage B pour $\Delta_F=0$. 28372 traces. Ajustement sur une loi lognormale.

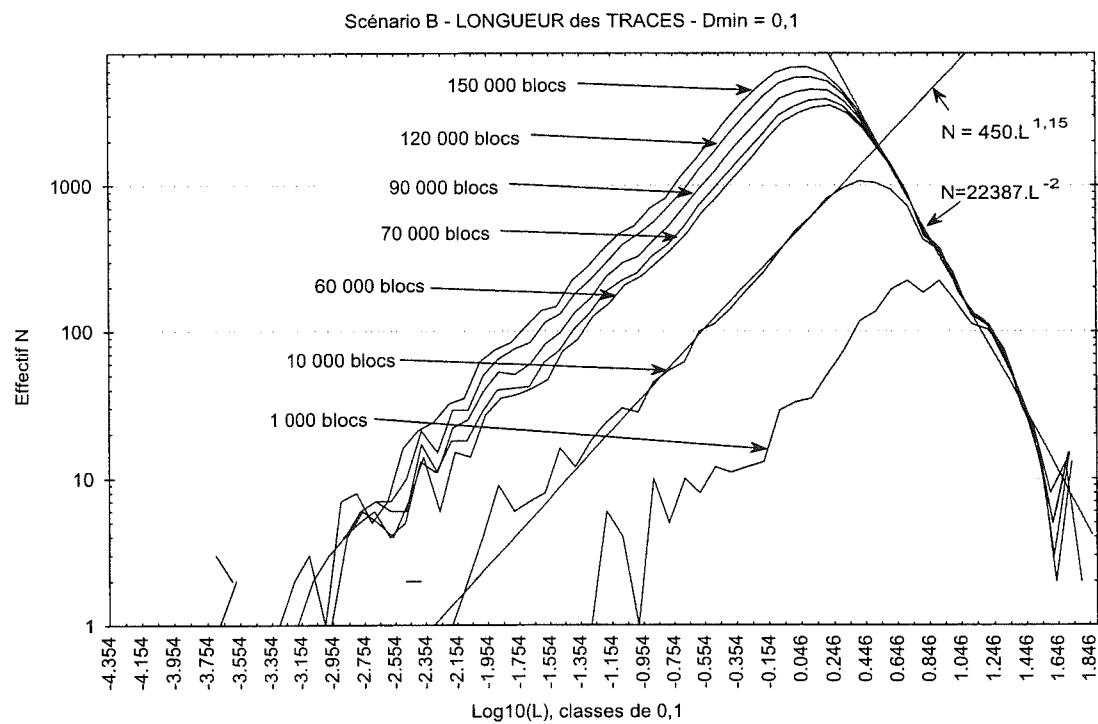


FIG. 105.- Scénario B. Longueur des traces pour un nombre variable de fractures, et pour une distance interfracturale minimale $\Delta_F=0,1$.

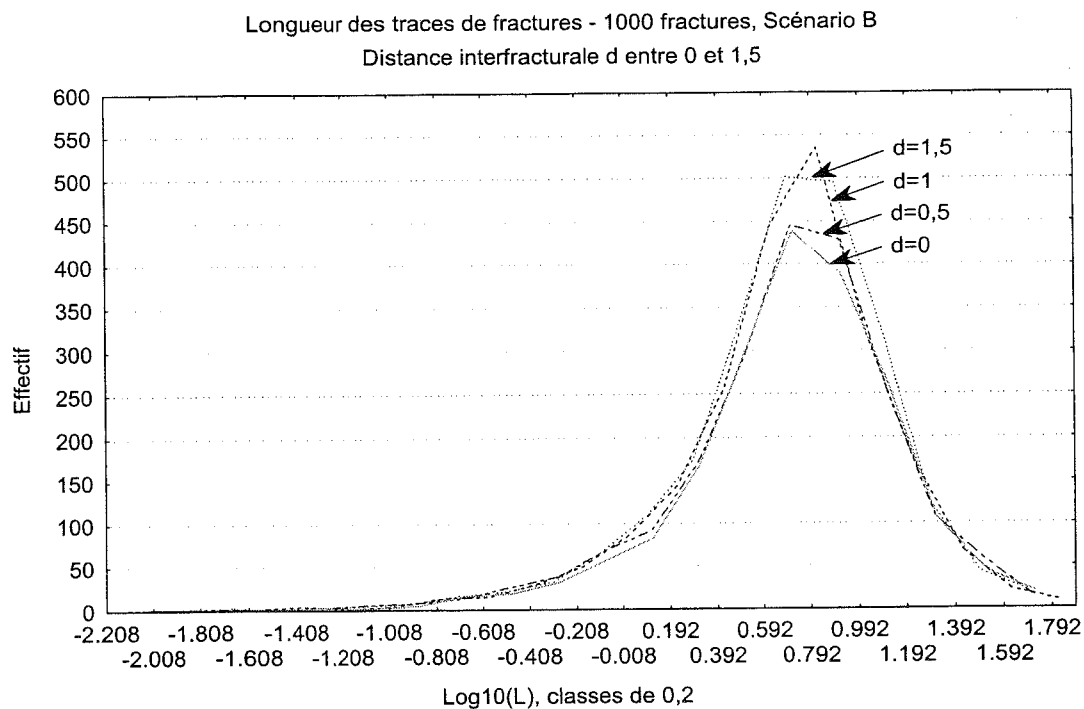


FIG. 106.- Processus B. Effet de la variation de la distance interfracturale Δ_F sur la distribution des longueurs de traces. 1000 fractures.

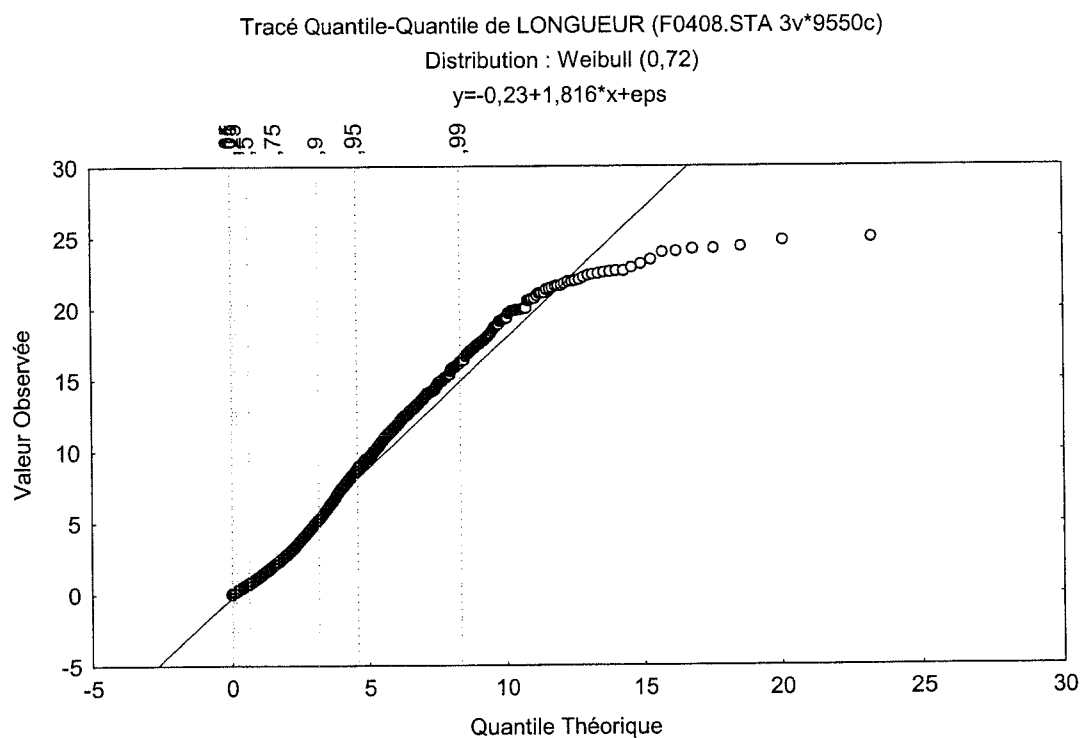


FIG. 107.- Approximation de la distribution des longueurs de trace dans le processus A par une loi de Weibull. Distance interfracturale minimale $D_F=0$.

B - Distribution des longueurs dans le processus A

Les distributions obtenues dans ce scénario ne sont

représentées ni par des lois lognormales ni par des lois bêta.

Pour $D_F=0$, c'est clairement la loi de Weibull qui fournit la meilleure approximation (fig. 107).

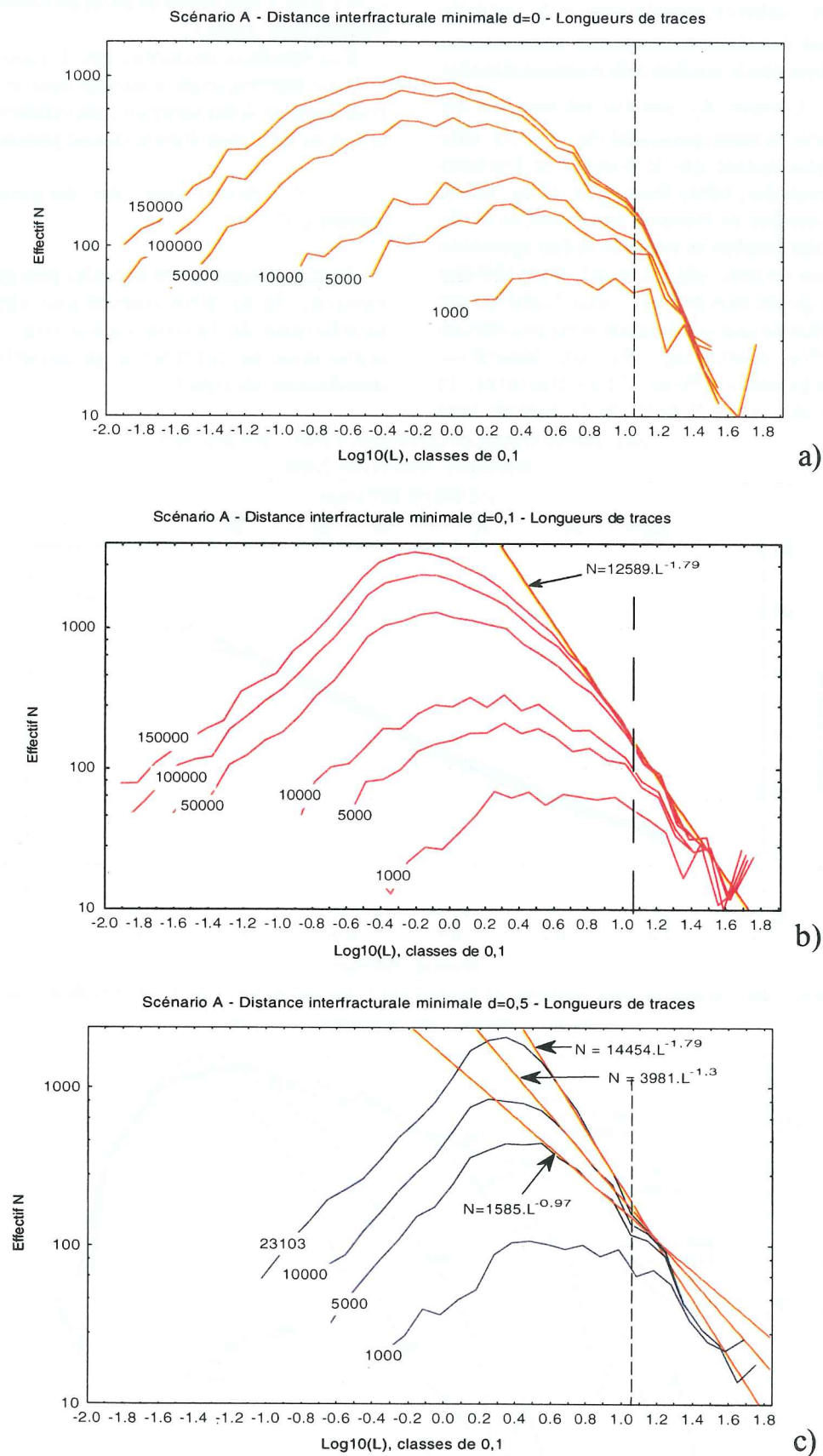


FIG. 108.— Processus A. Distribution des volumes pour un nombre de fractures croissant, et pour une distance interfracturale minimale d de a) 0, b) 0,1 et c) 0,5. Le nombre de fractures est figuré sur chaque courbe. En trait pointillé : limite de l'effet de taille finie. Des lois puissance apparaissent pour $d>0$.

L'allure des courbes est arrondie lorsque Δ_F est nulle (fig. 108a). La distribution ne montre alors aucune linéarité, quel que soit le nombre N de fractures réalisées ($N \leq 150\,000$). Lorsque Δ_F positive est imposée, les courbes prennent un aspect pyramidal (fig. 108b). L'effet est d'autant plus accusé que le nombre de fractures devient important (fig. 108c). Pour $\Delta_F=0,1$ (fig. 108b), et lorsque le nombre de fractures augmente, la partie supramodale des courbes se redresse et fait apparaître une linéarité, sur un intervalle limité de L . Pour 150 000 fractures, la pente mesurée de cette linéarité est $1,79 \pm 0,05$. Notons que la saturation n'est pas atteinte dans ce cas. Pour $\Delta_F=0,5$ (fig. 108c), une linéarité est observable également. Pour 23103 fractures, la saturation est atteinte, et la pente de la linéarité vaut

$1,76 \pm 0,05$. Cette valeur de pente est comparable à celle obtenue pour $\Delta_F=0,1$.

Ces résultats montrent que l'imposition d'une distance interfracturale minimale dans le processus de fragmentation A fait naître un comportement fractal pour ce qui est de la distribution des longueurs de fractures.

C - Distribution des longueurs dans le processus C

Pour les longueurs de traces les plus grandes ($L > 3$ environ), la loi bêta fournit une approximation satisfaisante de la distribution (fig. 109). La loi lognormale ne représente qu'imparfaitement les distributions de type C.

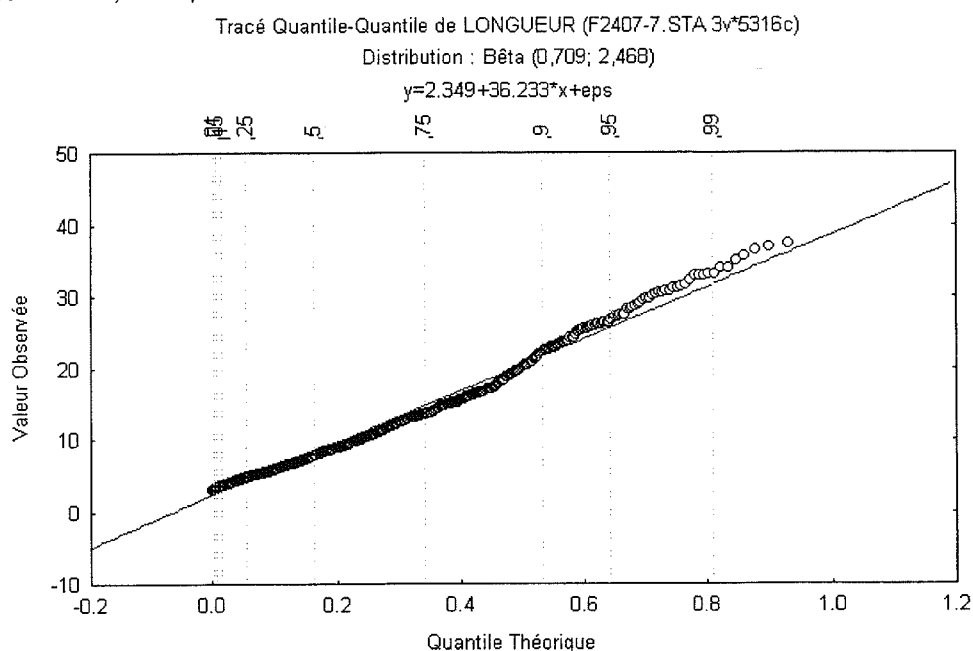


FIG. 109.- Ajustement des longueurs de trace produites par le processus C par une loi bêta pour $L > 3$. Probabilité $p=0,6$. 71918 blocs. 5316 traces.

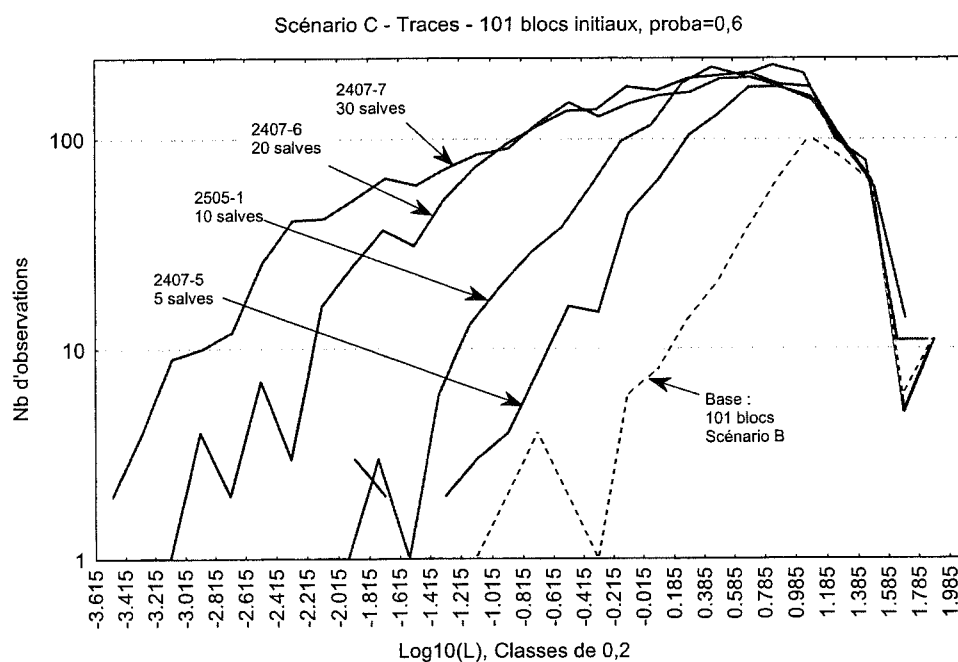


FIG. 110.- Distribution des longueurs de traces dans le processus C, pour diverses valeurs de nombre de blocs et une probabilité de fragmentation $p=0,6$. 5 salves (552 blocs), 10 salves (1680 blocs), 20 salves (11437 blocs), 30 salves (71841 blocs).

Une caractéristique importante des distributions correspondant à des processus de type C est que l'on n'observe pas de variation de la valeur du mode lorsque le nombre de traces ou le nombre de fractures augmentent. Par contre, le mode varie effectivement avec la probabilité de fragmentation (fig. 111).

D - Distribution des longueurs dans le processus D

Pour ce processus, on n'a pu réaliser un ajustement qu'avec une loi lognormale (fig. 112 et 113).

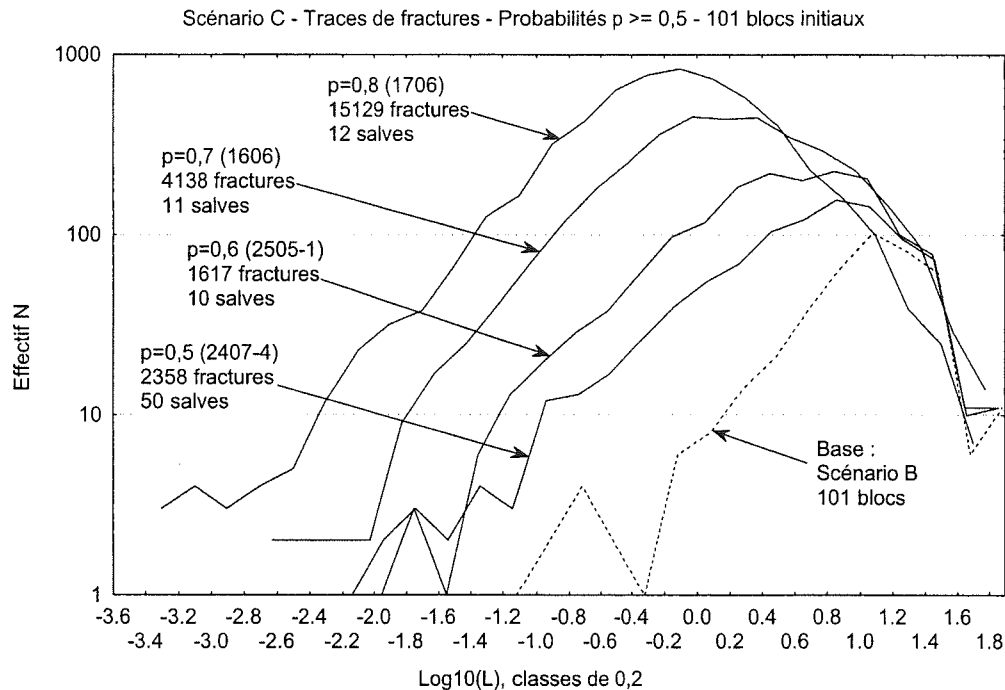


FIG. 111.- Distribution des longueurs de traces dans le processus C, pour diverses valeurs de la probabilité de fragmentation.

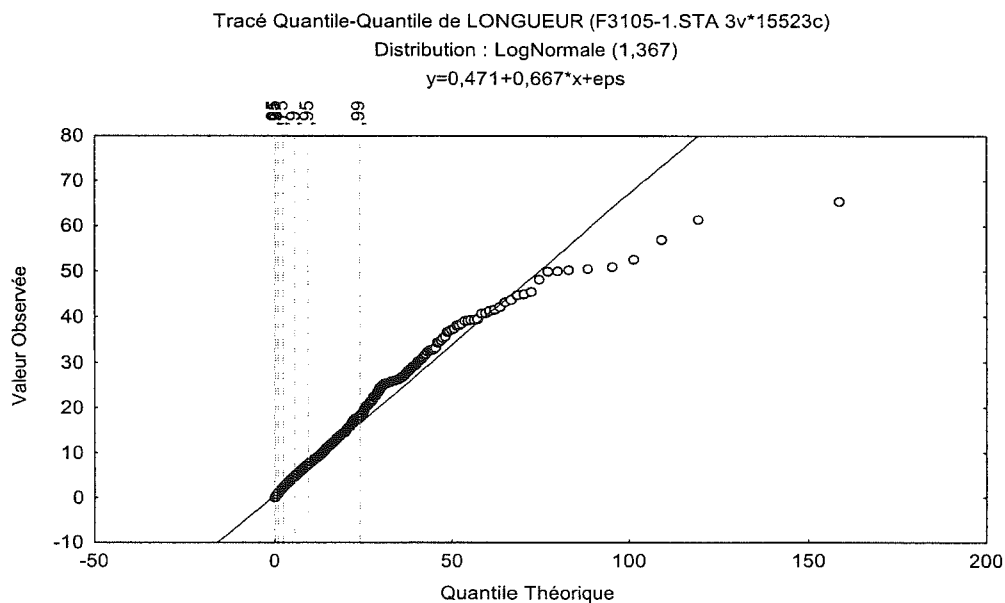


FIG. 112.- Ajustement lognormal de la distribution des longueurs de traces dans le processus de découpage D. Probabilité $p=0,6$. 15523 traces.

2.3.3.2. Détermination pratique du nombre de fractures dans le modèle

La connaissance du nombre de fractures existant dans un volume rocheux donné suppose un accès tridimensionnel au réseau, accès qui fait en général défaut. En bâtissant notre modèle tridimensionnel, nous avons imposé *a priori* le nombre de fractures N_{fract} .

Par ailleurs, notre travail sur les longueurs de traces a permis de mettre en évidence, pour les quatre processus de découpage envisagés, quatre variables présentant une signification pratique particulière. Il s'agit des éléments suivants :

- le nombre total N_T de traces relevées en section,
- la longueur L_{PP} la plus probable d'une trace de fracture en section, et
- le nombre N_{LPP} de telles fractures de longueur la plus probable ;

Ces trois variables constituent des éléments simples qui sont directement accessibles par la mesure à l'affleurement. Nous avons pu établir plusieurs relations entre ces quatre variables N_{fract} , N_T , L_{PP} et N_{LPP} (fig. 114).

Pour les quatre scénarios de découpage étudiés, le nombre N_{LPP} des traces de longueur modale décroît en loi puissance lorsque le mode L_{PP} augmente (fig. 114a) :

$$N_{LPP} = K \cdot L_{PP}^{-a} \quad (\text{II.36})$$

Les valeurs de a sont constantes pour le scénario A ($a \approx 1,3$) et le scénario B ($a \approx 1,88$). Ces valeurs évoluent légèrement avec la probabilité p dans les découpages de type C et D. Les valeurs pour $p=0,6$ sont portées sur la figure 114a. Pour $p=0,8$, l'exposant devient $-1,27$ pour le scénario C, et $-1,095$ pour le scénario D.

Par ailleurs, la diminution de la longueur la plus probable L_{PP} quand le nombre N_T de traces sur les sections croît, se fait en loi puissance également pour les processus A, B et D (fig. 114b) :

$$N_T = K' \cdot L_{PP}^{-b} \quad (\text{II.37})$$

Les valeurs relevées pour b sont de 1,35 pour le scénario A, et 1,91 pour le scénario B. Pour le processus D, b varie peu avec la probabilité : $b \approx 1,15$ ($p=0,6$) à 1,17 ($p=0,8$). Pour le processus C, les résultats obtenus pour b ne sont pas significatifs du fait du nombre trop réduit de traces. En revanche, la longueur la plus probable s'exprime dans ce cas par une loi exponentielle de la probabilité de fragmentation p (fig. 115).

Nous avons obtenu, pour 10 salves de fractures générées, et pour p compris entre 0,5 et 0,9 :

$$L_{PP} = K'' \cdot e^{\alpha p} \quad \text{avec } \alpha \approx 8 \quad (\text{II.38})$$

Enfin, nous avons pu établir une relation puissance entre le nombre N_T de traces relevées sur les sections et le nombre N_{fract} de fractures générées dans le modèle (fig. 114c) :

$$N_T = K''' \cdot N_{fract}^c \quad (\text{II.39})$$

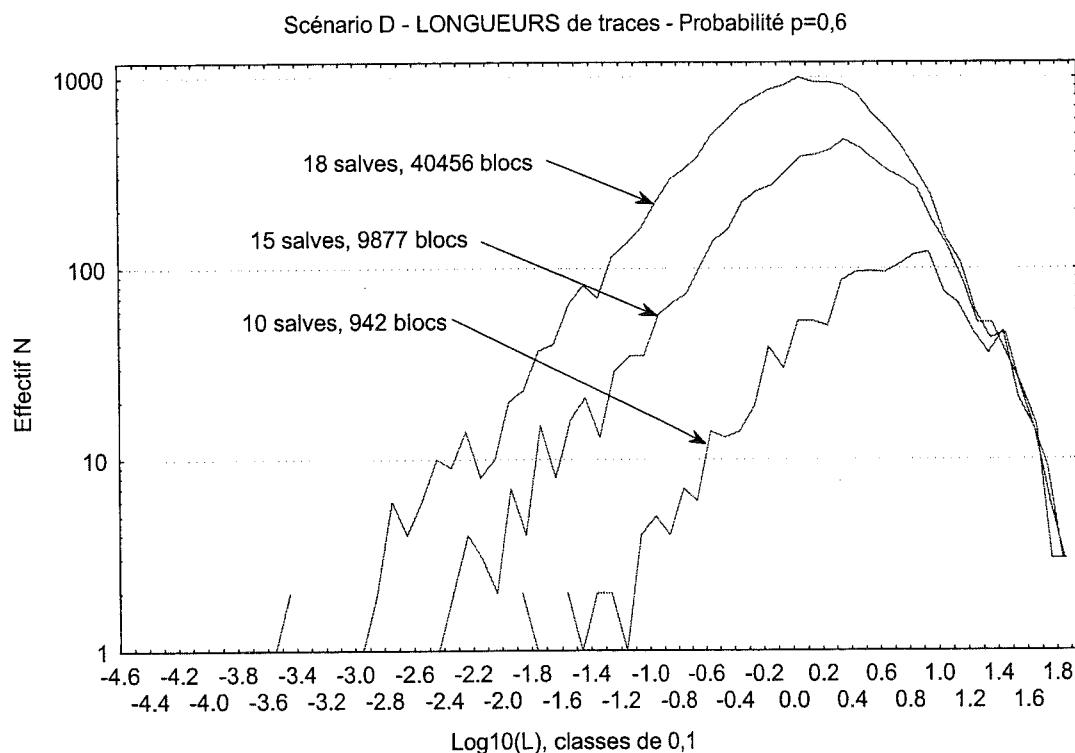


FIG. 113.- Scénario D. Evolution de la distribution des longueurs de traces avec le nombre de salves, pour une probabilité de division du bloc $p=0,6$. Etat initial composé de 9 blocs.

Les valeurs de c obtenues sont de 0,55 pour le scénario A, 0,615 pour le scénario D et 0,68 pour le scénario B. Pour le processus C, on remarque que la relation liant le nombre de traces observées en sections et le nombre de fractures générées dans l'enceinte du modèle n'est pas une loi puissance (fig. 114c). On observe une stabilisation du nombre de traces en sections. Une des causes de ce résultat est

vraisemblablement un sous-échantillonnage des petites traces lorsque le nombre de fractures augmente. De façon plus générale, ce sous-échantillonnage explique le nombre de traces obtenues plus faible (jusqu'à 10 fois par rapport aux autres processus) toutes conditions égales par ailleurs. L'absence de loi puissance dans cette série d'essais pourrait trouver en partie son explication dans la sous-représentation des petites traces.

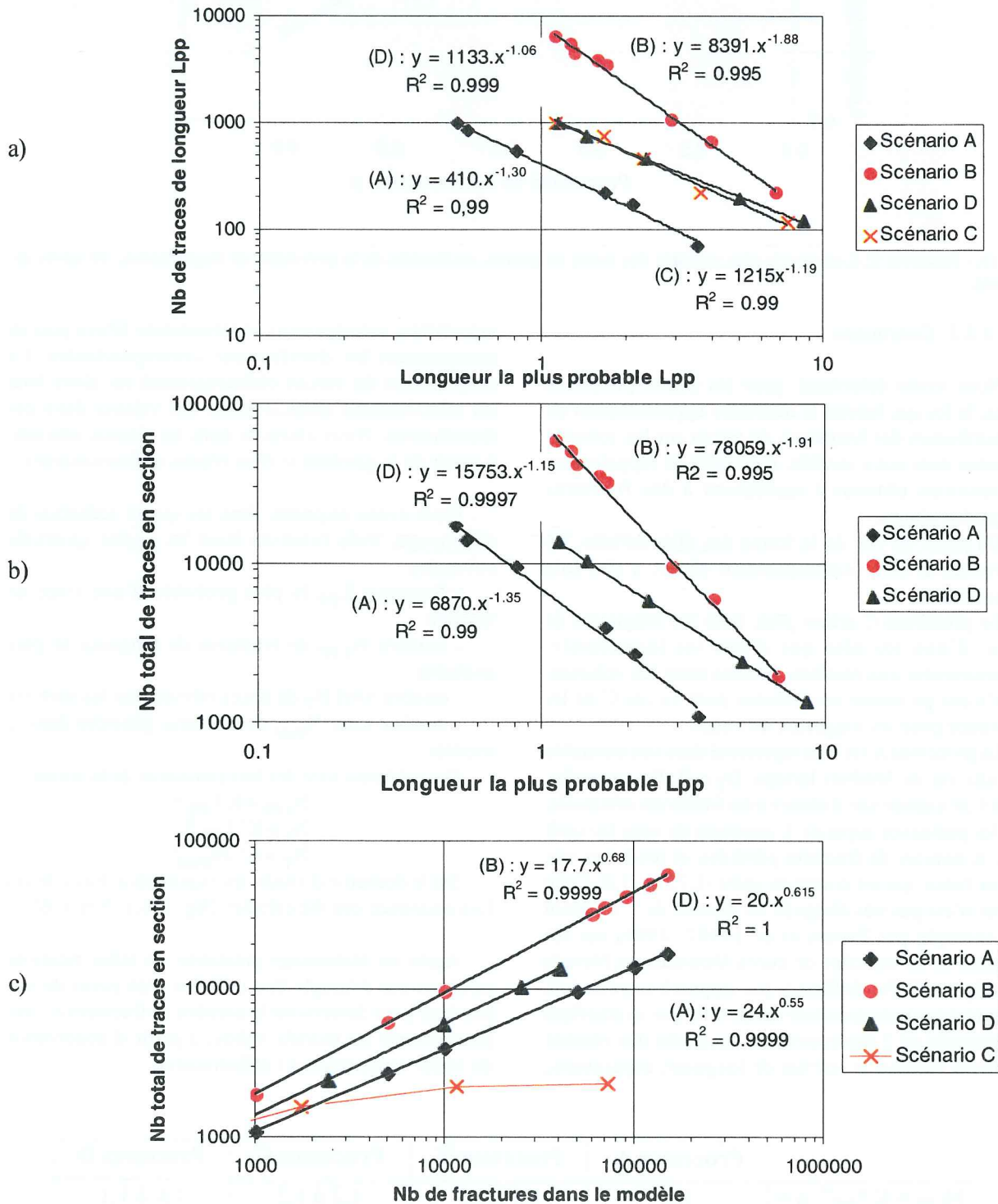


FIG. 114.— Pour les 4 types de découpage : a) Nombre de traces de longueur la plus probable; b) Relation nombre de traces en section / la longueur la plus probable; c) Relation nombre de traces en section / nombre de fractures du modèle. 11 sections parallèles dans le modèle. Les valeurs sont indépendantes de Δ_F pour le scénario B. $\Delta_F = 0$ pour le scénario A. Probabilité $p=0,6$ pour les scénarios C et D.

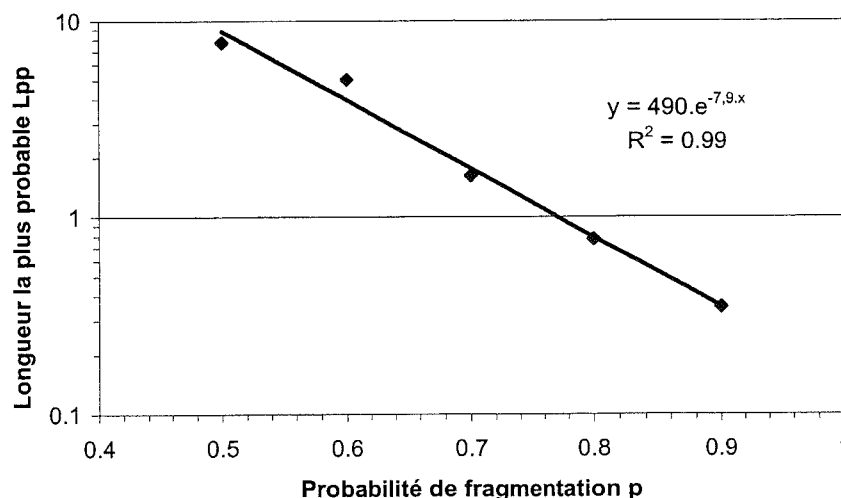


FIG. 115.— Processus C. Longueur la plus probable des traces en section, en fonction de la probabilité de fragmentation. 10 salves de fractures.

2.3.3.3. Conclusion

Nous avons déterminé, pour les quatre processus testés, la loi qui fournit la meilleure approximation de la distribution des longueurs de traces sur les sections réalisées dans notre modèle. Il est utile de rappeler que les résultats obtenus s'appliquent à des fractures supposées planes.

Du point de vue de la forme des distributions, les processus B et D correspondent plutôt à des lois lognormales.

Le processus C relève plus, pour les longueurs de trace, d'une loi bêta que d'une loi lognormale. Contrairement aux résultats obtenus pour les volumes, on n'a pas pu mettre en évidence pour ce cas C de loi puissance pour les longueurs de traces.

Le processus A est bien représenté dans son ensemble par une loi de Weibull lorsque $D_F = 0$. En revanche, quand on impose une distance interfracturale minimale, une loi puissance apparaît. L'exposant de cette loi croît avec le nombre de fractures générées, et tend vers une valeur limite qui est comprise entre -1,75 et -1,8. Cette valeur n'est pas très éloignée du résultat de 1,7 obtenu par exemple par Barton *et al.* [1987, 1995] sur les surfaces du tuf miocène de Yucca Mountain au Nevada de la figure 38. Par différence par rapport à notre travail, ces auteurs ont construit leur réseau de traces synthétique uniquement en 2 dimensions en analysant des réseaux de traces naturels en termes de longueur, espacement,

orientation, recoupement, et terminaison libres puis en construisant les distributions correspondantes. La construction du réseau bidimensionnel est alors faite en sélectionnant aléatoirement des valeurs dans ces distributions. Nous obtenons donc un résultat similaire à partir de la génération d'un réseau tridimensionnel.

Nous avons exprimé, dans les quatre scénarios de découpage, trois relations liant les quatre quantités suivantes :

- longueur L_{PP} la plus probable d'une trace de fracture
- nombre N_{LPP} de fractures de longueur la plus probable
- nombre total N_T de traces relevées sur les sections
- nombre total N_{fract} de fractures générées dans le modèle

Ces relations sont des lois puissance de la forme :

$$N_{LPP} = K \cdot L_{PP}^{-a}$$

$$N_T = K' \cdot L_{PP}^{-b}$$

$$N_T = K'' \cdot N_{fract}^c$$

Sur le domaine d'étude, les exposants a, b et c de ces lois puissance ont été calculés (fig. 114, 115 et 116).

Après un étalonnage préalable, de telles relations pourront par exemple être utilisées d'un point de vue pratique pour déterminer le nombre de fractures à créer pour obtenir un modèle valide, à partir d'observation de traces de fractures à l'affleurement.

	Processus A	Processus B	Processus C	Processus D
$N_{LPP} = K \cdot L_{PP}^{-a}$, a =	1,3	1,8 à 1,9	1,2 à 1,3	1,0 à 1,1
$N_T = K' \cdot L_{PP}^{-b}$, b =	1,35	1,9	voisin de 0	1,15 à 1,17
$N_T = K'' \cdot N_{fract}^c$, c =	0,55	0,65 à 0,70	---	0,58 à 0,61

FIG. 116.— Valeurs des exposants a, b, c des lois puissance dans l'étude des longueurs de traces pour les différents processus de découpage.

3.- CONCLUSION

Nous avons présenté le modèle géométrique OBSIFRAC. Nous avons vu comment la conception de la base de données permet de décrire d'une façon complète les différents éléments géométriques constitutifs d'un volume fracturé. Si l'on admet l'hypothèse de base de planéité des fractures, cette description est possible en trois dimensions, ce qui rend le modèle apte à prendre en compte des données concernant les volumes, surfaces ou les longueurs issus d'observations. Des données naturelles peuvent être intégrées selon deux voies. L'une est statistique et permet l'introduction de lois d'orientation des fractures par l'intermédiaire de la « matrice régionale ». L'autre est discrète et assure la représentation de discontinuités de position connue, par l'intermédiaire de la table des fractures forcées. L'intérêt de l'association des représentations discrète et statistique est développé dans notre Troisième Partie (Soultz-sous-Forêts).

Nous avons développé un moteur de fragmentation qui met en œuvre quatre algorithmes de division des blocs, nommés A, B, C et D. Le processus A correspond à la fragmentation d'un bloc tiré aléatoirement. Dans le processus B, c'est la position du point où naît la division qui est aléatoire. Le processus C correspond, par construction, à un processus fractal (division de probabilité p sans remise en jeu du bloc). Enfin, nous avons examiné le processus D, dans lequel nous avons introduit, par rapport au processus C, une remise en jeu des blocs divisés.

Les coupes réalisées dans le modèle ont permis une caractérisation descriptive de chacun de ces processus. Notamment, les cas A et B nous ont semblé fournir des figures visuellement proches d'observations susceptibles d'être faites sur le terrain. Les scénarios C et D aboutissent à des découpages du milieu présentant de très fortes disparités de volumes. Des « noyaux » très fracturés se développent entre de gros blocs. Cette disparité, jamais observé dans la nature sauf, peut-être, au niveau des gouges de failles fait de ces scénarios des processus peu vraisemblables *in situ*.

Au-delà de cette caractérisation visuelle, nous avons analysé, pour les quatre mécanismes de fragmentation, la distribution des éléments géométriques en trois dimensions (volumes), puis deux dimensions (longueurs de traces). Cette analyse a abouti aux résultats convergents suivants :

Les scénarios de découpage B et D donnent naissance à des distributions de volumes et de longueurs de traces lognormales, caractéristiques de processus purement aléatoires. Les distributions des traces de fractures montrent une loi puissance d'exposant -2 , traduisant un « remplissage » du plan. Ce résultat découle, dans le cas du processus B, du tirage aléatoire

des « germes » de fractures qui sont distribués uniformément dans l'espace. Dans le cas D, c'est le choix des blocs à fracturer qui est aléatoire, et non la position du germe. Cependant, dans ce cas le phénomène de remise en jeu des blocs fracturés introduit une composante stochastique sur la position de la fracture, suffisante pour faire naître une loi lognormale.

Dans le scénario de découpage de type C, nous avons pu mettre en évidence, dans la distribution des volumes, une loi puissance, et relier l'exposant de cette loi puissance à la probabilité de fragmentation p donnée en paramètre. La dimension fractale s'échelonne pour les volumes entre 0 pour $p=0,5$, et 3 pour $p=1$. Ces résultats sont en accord avec l'approche théorique d'Allègre [1982] à partir de laquelle ce processus a été défini.

Enfin, dans le scénario de découpage A, nous avons observé une dualité dans les distributions de volumes et de traces, selon que l'on impose ou non une distance minimale Δ_F entre fractures. Dans le cas où aucune distance minimale n'est imposée, les volumes, comme les longueurs de traces sont distribués selon une loi de Weibull. En revanche, en imposant un seuil bas pour la distance entre fractures, on modifie les répartitions qui suivent alors une loi puissance. Pour les volumes, la dimension fractale brute correspondante varie avec Δ_F et avec le nombre de fractures, entre 2,2 et 2,7. Pour les longueurs, la dimension brute est de l'ordre de 1,7 à 1,8. Les résultats concernant les longueurs de traces sont compatibles avec les calculs faits sur des données naturelles [Barton *et al.*, 1995], mais ils ont été obtenus à partir d'une conception tridimensionnelle d'un réseau de blocs.

Des lois puissance ont également été mises à jour, pour les quatre processus, dans les relations qui lient la longueur L_{PP} de fractures la plus probable, le nombre N_{LPP} de telles fractures, le nombre N_T de traces relevées sur les sections et les nombre total N_{fract} de fractures dans le modèle. Les exposants de ces lois ont été évalués. De telles relations sont susceptibles d'aider à la validation d'un modèle tridimensionnel à partir de données bidimensionnelles.

En résumé, nous avons, sur la base de la construction du modèle géométrique OBSIFRAC, testé l'effet tridimensionnel de quatre algorithmes de fragmentation. Seuls doivent être retenus comme vraisemblables *in situ* les algorithmes A et B. L'algorithme A sans imposition de distance interfracturale minimale est adapté à la modélisation des réseaux à forte anisotropie de volume (zones très divisées enfermées dans des zones de plus gros blocs) alors que l'algorithme B est plus probable dans le cas de réseaux isotropes. En introduisant une distance interfracturale minimale dans le processus A, nous voyons apparaître des propriétés fractales. Nous pouvons donc suggérer que dans les cas réels, la raison mécanique à l'origine d'une zone d'écrantage autour des fractures existantes joue un rôle majeur dans l'apparition des propriétés fractales dans les réseaux.

TROISIEME PARTIE

CHAPITRE 1

CONTRAINTES DE POSITION DES FRACTURES : APPLICATION AUX DONNÉES DU SITE GÉOTHERMIQUE DE SOULTZ-SOUS-FORÊTS

Nous avons démontré préalablement qu'il était possible de construire un modèle prenant en compte les données statistiques concernant la fracturation d'un site.

Pour parvenir à réaliser un tel modèle se pose inévitablement la question de l'échantillonnage. Les mesures de l'observation directe (affleurement) ou indirecte (forages, géophysique), caractérisées par l'existence d'une position absolue, constituent une source de données objectives du réseau fracturé que les modèles prennent rarement en considération.

L'intégration dans notre modèle des sources de données que sont les lois de distribution des orientations et des positions de fractures est une question difficile à laquelle nous proposerons une réponse, traitée à travers un exemple.

Nous avons choisi pour ce faire le cas du site de Soultz-sous-Forêts, dont la fracturation a été particulièrement étudiée en forage depuis plus de 10 ans.

Après une description du site et des travaux d'ingénierie qui y sont conduits, nous présenterons l'information recueillie sur la fracturation, nous tenterons un "calage" du modèle à l'aide de paramètres choisis, et nous montrerons enfin les utilisations potentielles du modèle proposé.

1.- LE SITE GÉOTHERMIQUE DE SOULTZ-SOUS-FORÊTS

1.1. Géologie régionale

Le site de Soultz-sous-Forêts se trouve au nord de la plaine d'Alsace, dans la partie médiane du fossé rhénan. Ce graben cénozoïque d'orientation NNE-SSW constitue la zone centrale du rift ouest-européen, prolongée au nord par le graben du Rhin, au sud par la plaine de la Bresse (fig. 117).

Le programme franco-allemand de géophysique profonde Ecors-Dekorp [1988] a mis en évidence par sismique l'asymétrie des structures dans le fossé [Brun *et al.*, 1991] (fig. 118). À l'ouest, la structure montre des blocs basculés, limités par des failles normales synthétiques, fortement inclinées (70°) à l'image de la faille rhénane occidentale. En allant vers l'est, c'est un

découpage par des failles normales conjuguées qui prend le relais. Brun *et al.* [1991] établissent un lien entre les accidents occidentaux très inclinés (faille rhénane) et l'amincissement observé de la croûte inférieure ductile. Ces accidents impliqueraient des zones profondes dans un mouvement listrique (fig. 118) [Brun *et al.*, 1991].

1.2. Contexte local

Le site de Soultz-sous-Forêts est implanté en bordure ouest du bassin nord-alsacien, à 4 km environ au sud-est de la faille rhénane occidentale. Cette faille sépare la zone mésozoïque du champ de fractures de Saverne, à l'ouest, de la plaine tertiaire à l'est.

Ce bassin cénozoïque a été exploré dans sa partie occidentale (région de Pechelbronn) par plusieurs milliers de forages pétroliers [Schnaebale, 1948 ; Dezayes, 1995]. Ces investigations ont mis en évidence un découpage en blocs hecto- à kilométriques, séparés par des failles normales antithétiques. Plus à l'ouest, le horst de Soultz occasionne une remontée du socle granitique jusque vers -1400 m (fig. 119).

1.3. L'anomalie géothermique

La région nord-alsacienne présente dans son ensemble un gradient géothermique supérieur à 60° par km, soit environ 2 fois les valeurs moyennes habituelles en bassin sédimentaire [Gérard *et al.*, 1984]. On a montré l'existence d'une circulation fluide par conduction-convection de grande amplitude à la base de la série sédimentaire (Bundsandstein), organisée en cellules convectives [Le Carlier *et al.*, 1994] (fig. 120). L'alignement des isothermes sur les linéaments de direction N 20° [Schnaebale, 1948] prouve que ces cellules correspondent aux blocs basculés limités par les grands accidents.

Localement, au droit du champ pétrolifère de Pechelbronn et de Soultz-sous-Forêts, l'anomalie, particulièrement forte atteint 105° par km [Gérard *et al.*, 1984]. L'étude de profils thermiques à cet endroit a montré une brusque diminution du gradient, de plus de 50 °/km, lorsqu'on atteint le socle granitique (fig. 121). La couverture sédimentaire joue donc le rôle d'une surface isotherme chaude [Gérard *et al.*, 1984].

C'est à ce dispositif thermique naturel que s'adresse l'exploitation géothermique de Soultz-sous-Forêts.

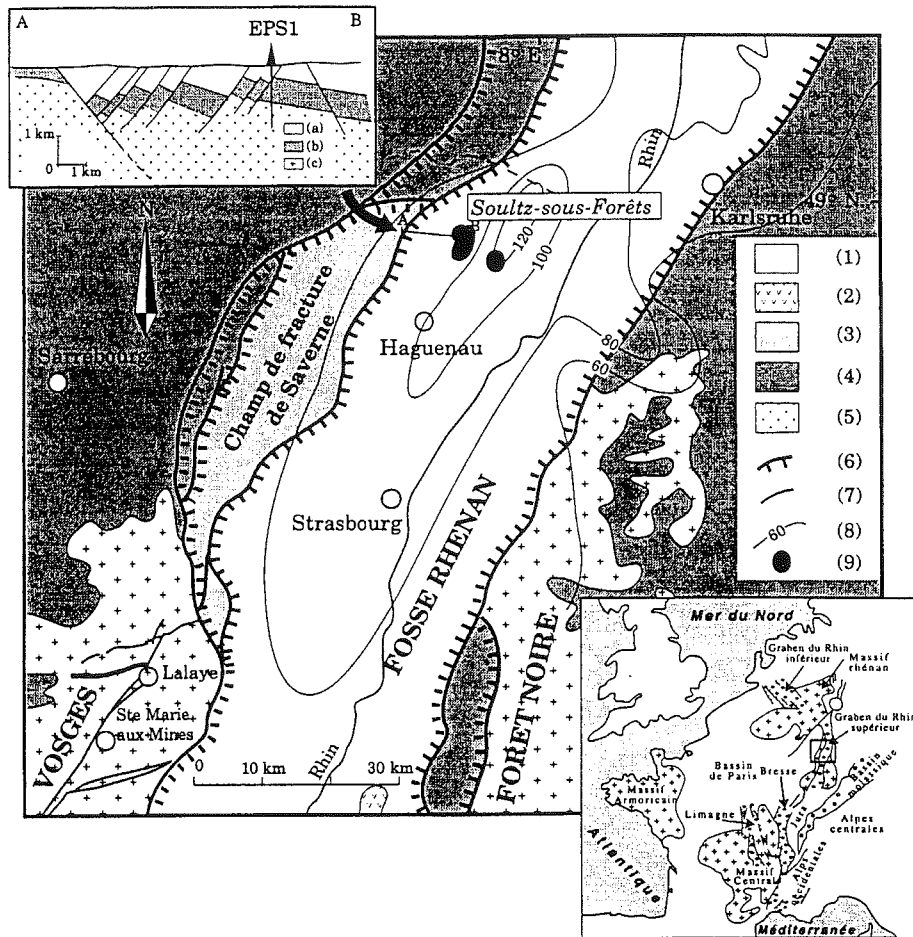


FIG. 117.- Carte géologique structurale simplifiée du fossé rhénan : (1) Remplissage sédimentaire oligo-miocène, (2) Volcanisme cénozoïque, (3) Jurassique, (4) Trias germanique, (5) Socle hercynien, (6) Failles bordières du graben, (7) failles, (8) Isogrades géothermiques ($^{\circ}/\text{km}$) (9) Zones d'investigation géothermique (d'après Dezayes [1995]).

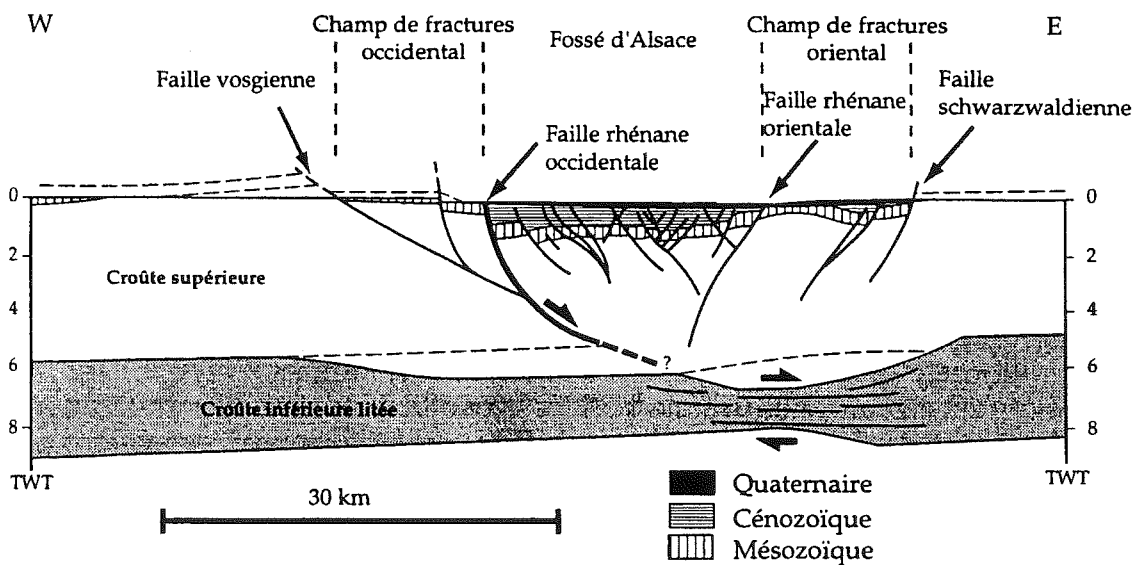


FIG. 118.- Coupe interprétative du profil ECORS (d'après Brun *et al.* [1991]). TWT : secondes temps double.

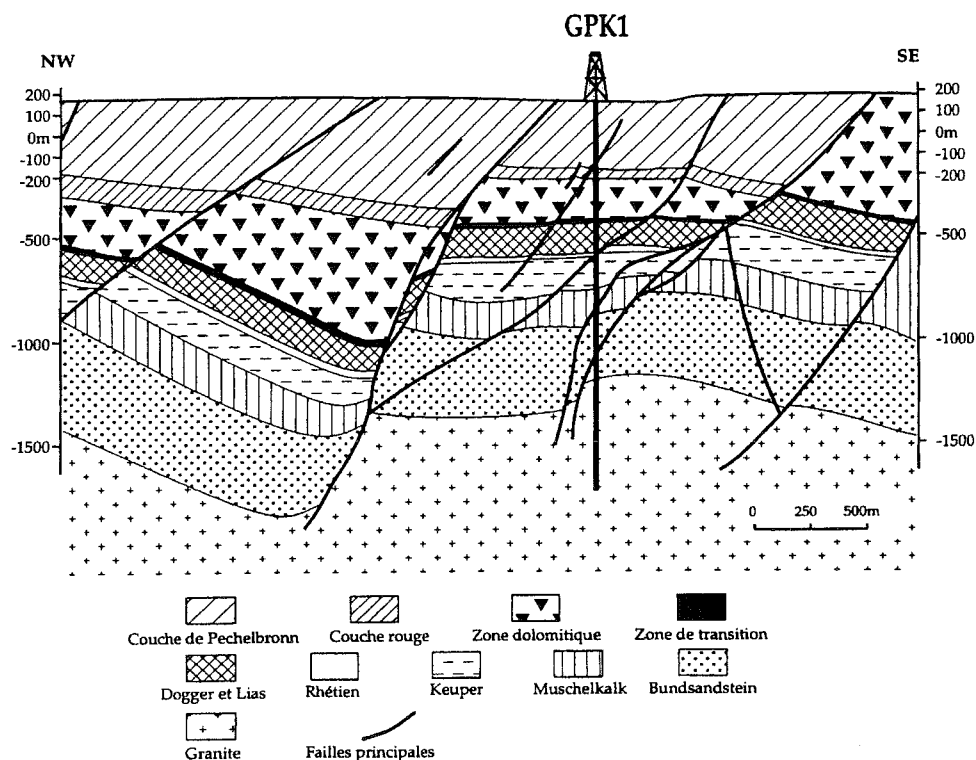


FIG. 119.- Coupe géologique passant par le forage géothermique GPK1 (d'après Cautru [1987] modifiée par Dezayes [1995]). Coupe réalisée par les données de sismique réflexion. On observe les failles normales antithétiques permettant une remontée du socle granitique jusqu'à -1400 m.

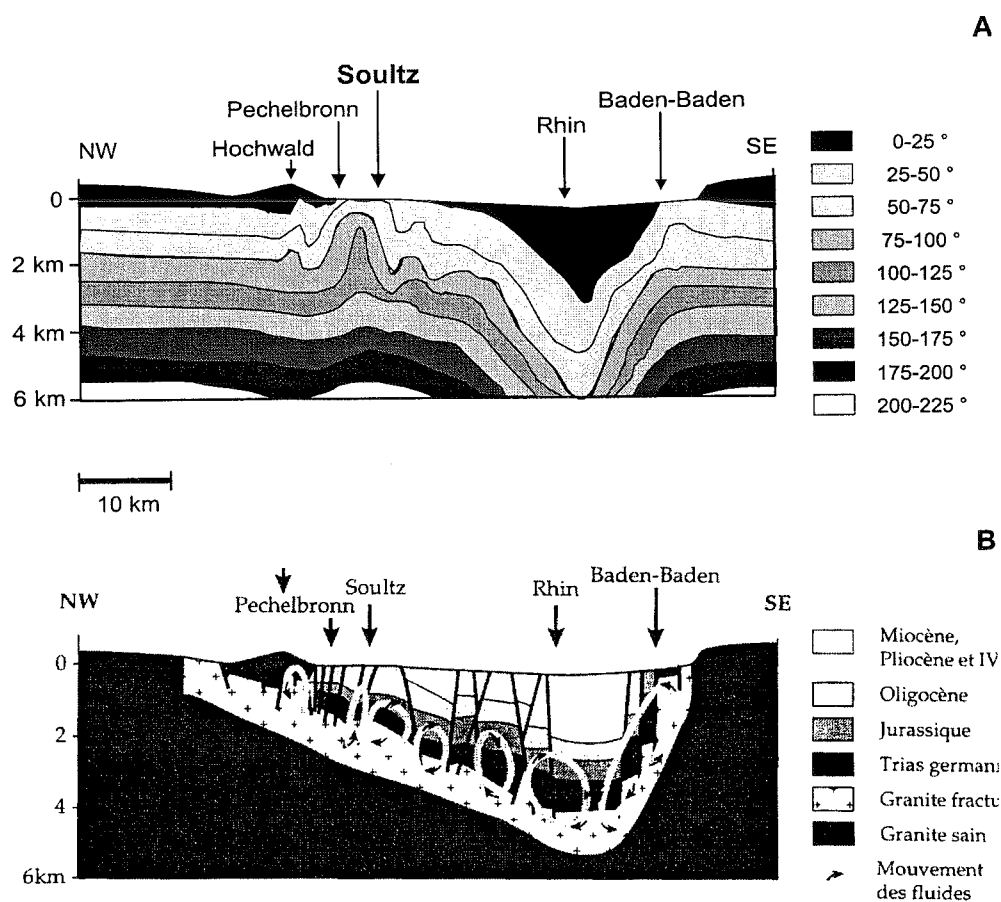


FIG. 120.- Gradient géothermique (A) et modèle de circulation des fluides (B) dans le fossé rhénan (d'après Le Carlier *et al.* [1994], modifiée par Dezayes [1995]).

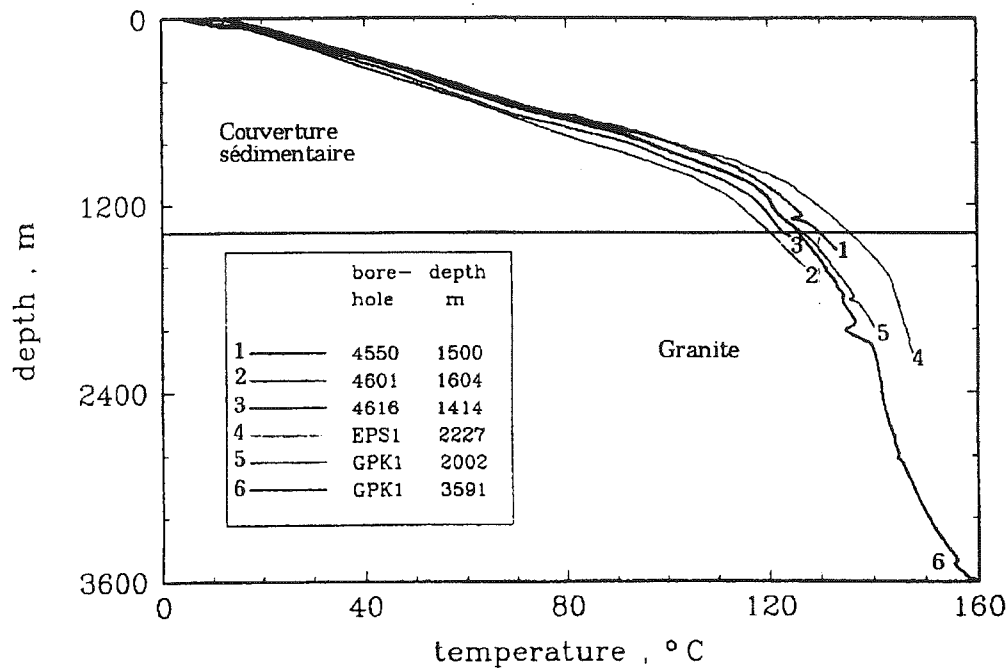


FIG. 121.— Profils thermiques dans les puits de Soultz-sous-Forêts [Garnish *et al.*, 1994].

2.— LA GÉOTHERMIE HDR ET SON APPLICATION AU SITE DE SOULTZ-SOUS-FORÊTS

2.1. Principe de la géothermie HDR

La géothermie HDR (*Hot Dry Rock*) ou RCS (Roches Chaudes Sèches), développée dans les années 80 est une des approches les plus récentes de la géothermie. Elle cible les milieux cristallins ou métamorphiques profonds, secs et peu perméables, présentant de préférence un géotherme fort.

Le projet européen HDR comportait trois sites expérimentaux : Rosemanowes en Cornouaille anglaise [Parker, 1989], Bad Urach dans le Jura souabe en Allemagne [Tenzer, 1995] et Soultz-sous-Forêts en Alsace.

La technique consiste à exploiter l'énergie profonde en faisant fonctionner un échangeur thermique souterrain, dont les performances sont artificiellement améliorées. Une injection sous haute pression d'eau et de saumure en tête de forage provoque une fracturation hydraulique destinée à augmenter fortement la perméabilité du milieu en stimulant les fractures existantes. Ces fractures peuvent ensuite être maintenues ouvertes par des agents de soutènement (billes de verre ou de silicone) et leur réseau constitue ainsi l'échangeur. L'exploitation de l'échangeur est faite par un doublet de puits, puits d'injection et un puits de production. Le fluide froid injecté par le premier puits est réchauffé à 150-170° dans le réseau souterrain [Gérard *et al.*, 1998]. Le puits de production permet l'extraction du fluide réchauffé à 140°C environ. Ce fluide est refroidi à 65° par un échangeur, puis réinjecté dans le puits froid (fig. 122).

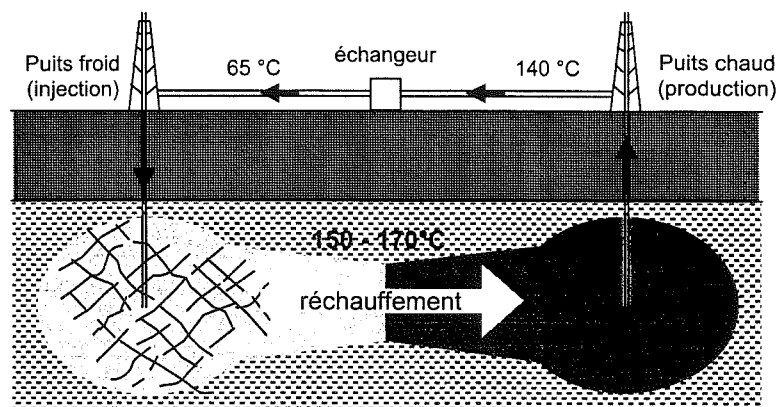


FIG. 122.— Schéma de principe de l'exploitation géothermique HDR de Soultz-sous-Forêts.

2.2. Les travaux d'ingénierie

Jusqu'en 1951, plusieurs milliers de forages pétroliers ont été réalisés à l'ouest de Soultz-sous-Forêts, dont 2 ont atteint le socle granitique. Quatre d'entre eux sont encore utilisés pour l'observation de la sismicité locale, notamment celle induite par l'exploitation. Le projet HDR a conduit à forer trois puits profonds nommés GPK1, GPK2 et EPS1 (fig. 123).

Le puits GPK1 a été réalisé en mode destructif en 1987, jusqu'à une profondeur de 2000 m, puis approfondi en 1992 jusqu'à -3590 m (GPK1 bis). Le socle granitique y est atteint à -1376 m. Ce puits GPK1, destiné à jouer le rôle de puits froid a fait l'objet en 1993 d'injection de 45000 m³ d'eau pour créer par fracturation hydraulique l'échangeur souterrain, entre -2810 et -3590 m.

En 1990, le puits d'observation EPS1 a été entièrement carotté. Initialement prévu pour atteindre -3500 m, le forage a été abandonné à -2230 m en raison d'une déviation trop importante en fond de trou (plus de 22°). Il a atteint le granite à -1417 m.

Les données de la microsismicité induite par la suppression de fluide injecté (fig. 124) ont permis de cibler la périphérie de l'échangeur artificiellement créé, et de forer en 1994 le puits GPK2 (destructif) jusqu'à -3876 m. Ce puits, destiné à la production est situé à 450 m de GPK1. Le socle y a été rencontré à -1406 m. En 1995 et 1996, GPK2 a été "stimulé" par injection de saumure et d'eau entre -3200 et -3600 m.

Deux tests de circulation ont été effectués, dont un de 4 mois en 97. Il a été possible d'instaurer un débit de 25 kg/s, permettant une température de production allant jusqu'à 142°C, croissante durant tout le test. Le bilan énergétique est le meilleur obtenu jusqu'alors dans les systèmes HDR [Baria *et al.*, 1998].

Une extension jusqu'à -5000 m du puits GPK2 est cours de réalisation, avec comme but de démontrer que l'exploitation est possible à des températures approchant les 200°C, avec un contexte *in situ* tout aussi favorable.

Le système géothermique de Soultz-sous-Forêts présente une originalité qui le distingue des travaux menés antérieurement, notamment aux Etats Unis. Selon cette première approche, on ciblait des massifs compacts (donc de grande impédance) et de haute température en quelques régions privilégiées. L'énergie de circulation était entièrement fournie dans le puits d'injection, et une contrepression forte devait être exercée dans les puits d'extraction pour éviter la fermeture des fractures. Malgré un gradient géothermique souvent intéressant, la difficulté de circulation entre puits limitait la rentabilité du dispositif.

Par opposition, le "concept Soultz" permet l'exploitation d'un massif naturellement très fracturé, présentant au moins une contrainte horizontale faible. Cette contrainte, mesurée dans le premier forage guide l'implantation du ou des forage(s) de production. En réduisant l'impédance, elle permet une exploitation de plus gros volumes, avec des pressions moindres, sur des distances plus grandes. La fréquence des massifs fracturés permet d'envisager une généralisation commerciale et industrielle de cette technique [Bourrellet, 1998].

2.3. Nécessité d'un modèle tridimensionnel de fracturation

L'approche développée à Soultz-sous-Forêts, par son côté plus "déterministe" repose sur une investigation du terrain largement plus poussée que dans l'approche américaine, plus théorique.

D'une part, à grande échelle, la circulation entre des puits peut être grandement améliorée par une bonne connaissance du réseau de fractures hydrauliquement productif. Il s'agit bien là d'une détermination discrète du réseau de fractures, qui présente un grand intérêt pour l'exploitation économique du site.

D'autre part, à une échelle plus locale, les caractéristiques individuelles des zones de circulation doivent être mieux connues pour répondre au but majeur qui est l'abaissement de l'impédance.

Deux voies de recherche permettront d'optimiser le flux :

- la compréhension des interactions géochimiques roche - saumure dans les conditions spécifiques de l'expérience (haute pression et haute température) ;
- celle des comportements rhéologiques locaux, conditionnés par la géométrie des fractures.

Le recours à des modèles tridimensionnels réalistes, et aussi déterministes que possible apparaît ainsi indispensable pour limiter l'expérimentation coûteuse *in situ*, à la fois dans le choix du massif cible dans son ensemble, et lors de l'implantation des puits de production.

Aussi la recherche actuelle sur le sujet HDR est-elle marquée par une relative diversité de modèles numériques ou conceptuels. Nous donnons ci-après une brève revue des travaux de recherche actuels dans lesquels la géométrie du réseau est impliquée.

Tenzer *et al.* [1998] ont étudié à partir de diagrapies UBI la répartition des orientations de 2699 fractures dans les puits GPK1 et GPK2. Ils évaluent également la répartition des orientations des joints avec la profondeur, et, plus grossièrement, leur ouverture apparente. Ces auteurs peuvent ensuite interpréter les diagrammes de circulation de fluide et évaluer le rôle des fractures

hydrauliquement actives d'épaisseurs et d'orientations différentes. Ils confirment qu'une grande partie des pertes hydrauliques lors de l'injection a lieu sur les fractures de grande ouverture.

Pribnow et Clauser [1998] tentent d'élaborer un modèle de la circulation entre GPK1 et GPK2. Ils construisent un maillage d'éléments finis porté par deux plans majeurs du système de failles régionales (N10° 80W et N150° 75E). La grille ainsi obtenue peut être considérée comme de dimension 2,5, puisqu'elle est constituée d'éléments 2D dans un espace 3D. A ce dispositif sont connectés les volumes stimulés autour des deux puits, en tant que milieux poreux équivalents. Enfin, des propriétés thermiques sont données au système par le biais d'une matrice 3D.

D'autres auteurs soulignent l'intérêt direct d'une modélisation géométrique du réseau fracturé pour évaluer la viabilité économique d'un site géothermique HDR [Holton *et al.*, 1998].

Bruel [Bruel, 1998] combine dans un modèle une description stochastique du réseau et une description déterministe des structures connues pour leur importance hydraulique. Il utilise les données géométriques des puits, la microsismicité, et les logs de production pour tenter d'en tirer les paramètres principaux de l'échangeur (temps de résidence, porosité équivalente). Son modèle prend en compte la mécanique non linéaire des interactions, le transfert de masse et de chaleur. Il en déduit une confirmation de la nature ouverte du réseau de fractures entre les deux puits.

Le modèle de Tezuka *et al.* [1998], appliqué au réservoir du site HDR de Hijori (Japon) permet également l'utilisation de données mixtes, déterministes et stochastiques. Les fractures déterministes sont d'abord introduites dans le modèle. Ensuite, les paramètres de génération du réseau stochastique sont donnés par l'opérateur. Le réseau stochastique est alors généré à partir de données BHTV, de telle façon que le réseau dans son ensemble, fractures déterministes comprises, réponde aux paramètres stochastiques choisis. Une relation est fixée entre le rayon des fractures et leur ouverture. Une critique à l'adresse de ce modèle est le fait que les fractures soient représentées par des disques. Si les coupes montrent un aspect acceptable (fig. 125), ce modèle perd de sa vraisemblance en 3D.

Un modèle intéressant du point de vue conceptuel est celui de Genter *et al.* [1998] enrichi des éléments fournis par Gérard *et al.* [1998], qui sera décrit plus bas.

Par ailleurs, des travaux récents ont fourni de nouvelles sources d'information qui pourront utilement participer à l'alimentation d'un modèle de la géométrie du site. Citons par exemple les résultats concernant la microfissuration, révélée sous la forme d'inclusions fluides dans le quartz [Dezayes *et al.*, 1998, 2000], ou encore la fracturation de relaxation, qui traduit des zones de faiblesse dans le granite, qu'elle corresponde ou non à la microfissuration [Dezayes *et al.*, 1996].

Plus généralement, le site de Soultz-sous-Forêts offre un éventail remarquable d'informations relatives à la fracturation, dont nous donnerons maintenant l'essentiel.

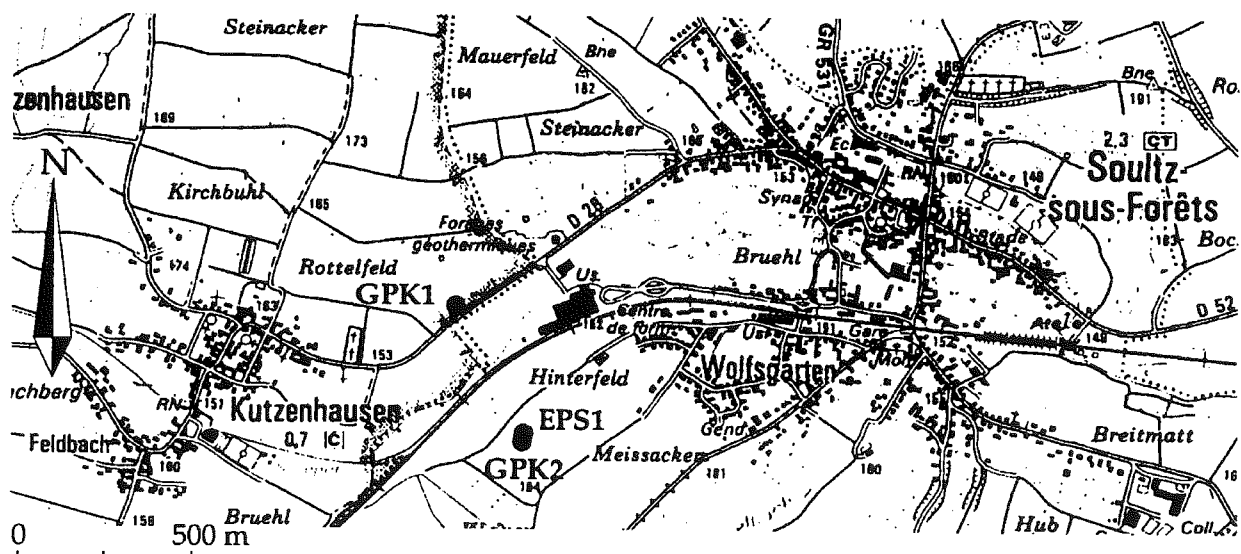


Fig. 123.- Situation géographique des forages géothermiques profonds de Soultz-sous-Forêts (carte IGN à 1/25 000 Haguenau).

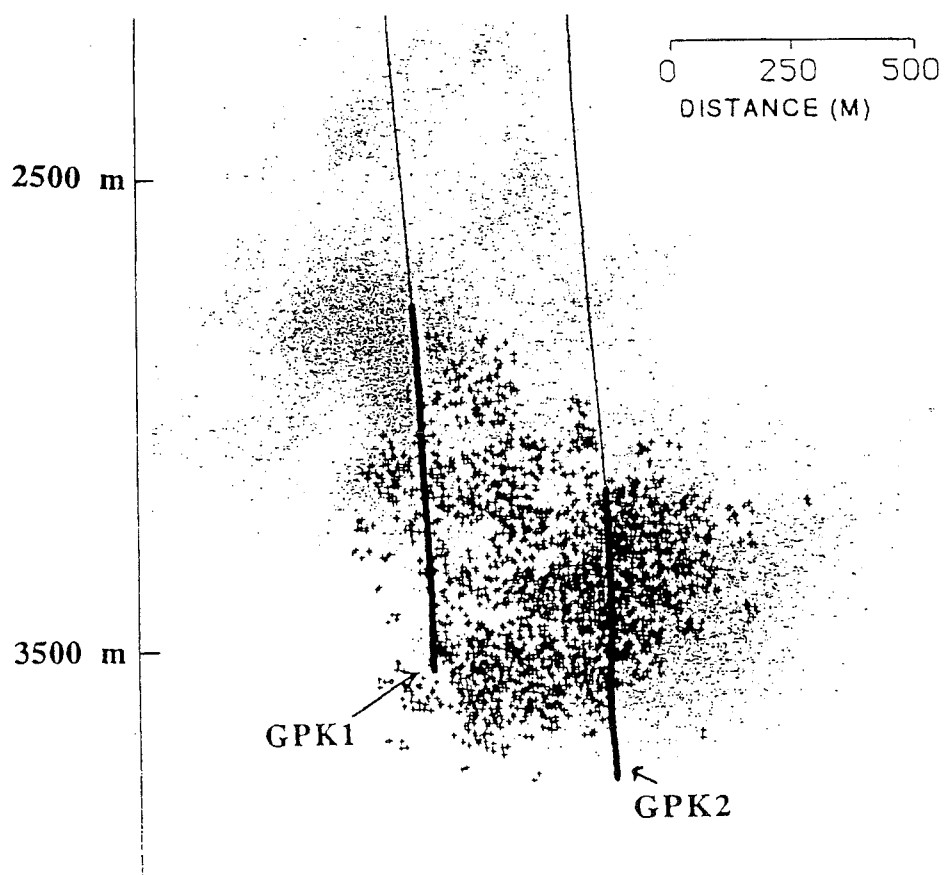


FIG. 124.- Répartition des microséismes induits, révélant la fracturation hydraulique dans chacun des puits GPK1 et GPK2. Vue dans la direction N235° [Gérard *et al.*, 1998].

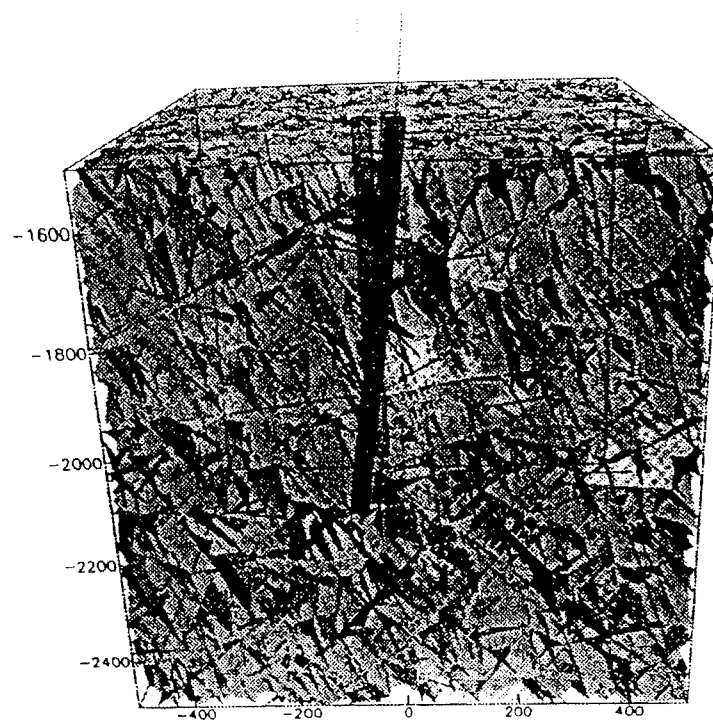


FIG. 125.- Modèle stochastique d'un réseau de fractures sur le réservoir géothermique du site HDR japonais de Hijori [Tezuka *et al.*, 1998].

3.- LES DONNÉES RECUEILLIES SUR LA FRACTURATION

Après une description rapide des méthodes d'investigation utilisées sur le site, nous verrons comment les résultats obtenus ont suggéré le choix des paramètres de notre modèle.

3.1. Méthodes utilisées

3.1.1. Observation directe et diagraphies classiques

Le forage EPS1 a fourni 1287 m de carottes, dont 800 m dans le granite, entre -1420 et -2220 m, donnant un total de plus de 3600 fractures. L'observation directe a été faite en détail par Dezayes [1995].

Outre les méthodes de diagraphie classique (pendagemétrie, gamma-ray, capture photoélectrique), l'imagerie acoustique et électrique ont été mise à profit pour obtenir une représentation développée à 360° des parois des puits de forage destructif ou carotté. L'intersection d'un plan de fracture avec le puits donne une ellipse, dont le développement sur un plan correspond à une sinusoïde.

3.1.2. Imagerie acoustique

Le Borehole TeleViewer (ou BHTV) comporte un émetteur - récepteur ultrasonique qui scrute les parois du puits par un mouvement hélicoïdal, en relevant le temps de parcours de l'onde (en ms) et l'amplitude de l'onde réfléchie (en dB). Un système d'orientation intégré permet de donner des images corrigées et orientées, d'autant plus nettes que la paroi est plus rugueuse (forages destructifs). Les fractures sont repérées par les anomalies d'amplitude ou par un temps de transit infini (fractures ouvertes) [Serra, 1985 ; Barton et Moos, 1988]. La résolution horizontale du BHTV est de 128 points.

L'Ultrasonic Borehole Imager (UBI) de Schlumberger fonctionne selon le même principe en permettant une résolution horizontale de 140 points.

3.1.3. Imagerie électrique

Ces outils mesurent la microrésistivité de la roche sur les parois du forage. Les techniques Schlumberger Formation Micro Scanner (FMS) et Fullbore Formation Micro Imager (FMI) parcourent longitudinalement la surface du puits à explorer, par respectivement 4 et 8 patins de conduction. Le FMI permet une couverture totale de la surface interne du puits lorsque le diamètre de celui-ci est inférieur à 6,25", et restitue une image de résistivité réelle à 256 niveaux. La pénétration de ces outils est millimétrique.

L'Azimuthal Resistivity Imager (ARI) couvre lui 360° par 12 capteurs et offre une pénétration centimétrique. L'analyse conjointe des résultats FMI et ARI permet de distinguer les discontinuités selon leur extension autour du puits.

3.1.4. Inclusions fluides

L'étude des inclusions fluides secondaires dans les grains de quartz a été faite par Dezayes [2000]. Ces inclusions d'une taille moyenne de 20 μ m sont les cicatrices de microfractures postérieures à la formation du minéral porteur. Elles correspondent à des fentes de tension [Lespinasse et Pecher, 1986]. L'examen microscopique a été fait à partir de 3 sections orthogonales. Il a porté sur 4 niveaux de forage différents (-1416, -1624, -2055 et -2179 m), avec 800 à 1600 mesures par niveau.

3.2. Résultats

On ne donne ici que les résultats principaux utilisés pour notre étude. On se reportera aux travaux de Dezayes [1995] pour la reconstitution des épisodes tectoniques et des contraintes correspondantes.

3.2.1. Typologie des fractures

3.2.1.1. Fracturation à grande échelle

Les failles normales d'échelle hectométrique à kilométrique ont été repérées précocement par l'exploration pétrolière [Schnaebele, 1948], notamment par la sismique réflexion [Foehn, 1985]. Ces données ont permis l'élaboration de modèles de compartiments faillés à l'échelle du bassin, dans un but de reconstruction des contraintes [Hosni, 1997]. Il est évident qu'un modèle géométrique à cette échelle devra intégrer de façon déterministe les accidents reconnus, pouvant jouer le rôle de conducteurs préférentiels.

3.2.1.2. Zones fracturées

Par ailleurs, les travaux d'ingénierie menés à Soultz concentrent de plus en plus les investigations vers une meilleure connaissance des "zones fracturées", responsables d'un écoulement préférentiel selon des chenaux hydrauliques [Gérard *et al.*, 1998 ; Tenzer *et al.*, 1998 ; Genter *et al.*, 1998 ; Pribnow et Clauser, 1998]. Ces zones montrent une densité locale de fractures importante et abritent souvent des brèches ou microbrèches. Elles peuvent être le siège d'une altération hydrothermale intense, souvent alors marquée par l'apparition de minéraux secondaires (illite, chlorite, corrensite, calcite, hématite, épidote) aux dépens des silicates primaires, et la précipitation de quartz (fig. 127). Ces zones complexes montrent une porosité pouvant aller jusqu'à 25% localement, plus importante dans la partie altérée que dans la partie bréchifiée, qui est souvent scellée par les produits hydrothermaux. Elles combinent donc les propriétés de milieux poreux et du milieu fracturé. Deux conséquences majeures sont à retenir en termes d'ingénierie géothermique. D'une part, la circulation sera celle d'un milieu mixte poreux et fracturé. Ces zones de "clusters" (amas) de fractures peuvent être considérées comme des couches poreuses

dans le granite comparativement sain [Gérard *et al.*, 1998]. D'autre part, cette circulation de fluide aura lieu dans un contexte géochimique rendu agressif par les produits hydrothermaux (carbonates, hématite, sulfures et sulfates) [Gérard *et al.*, 1998].

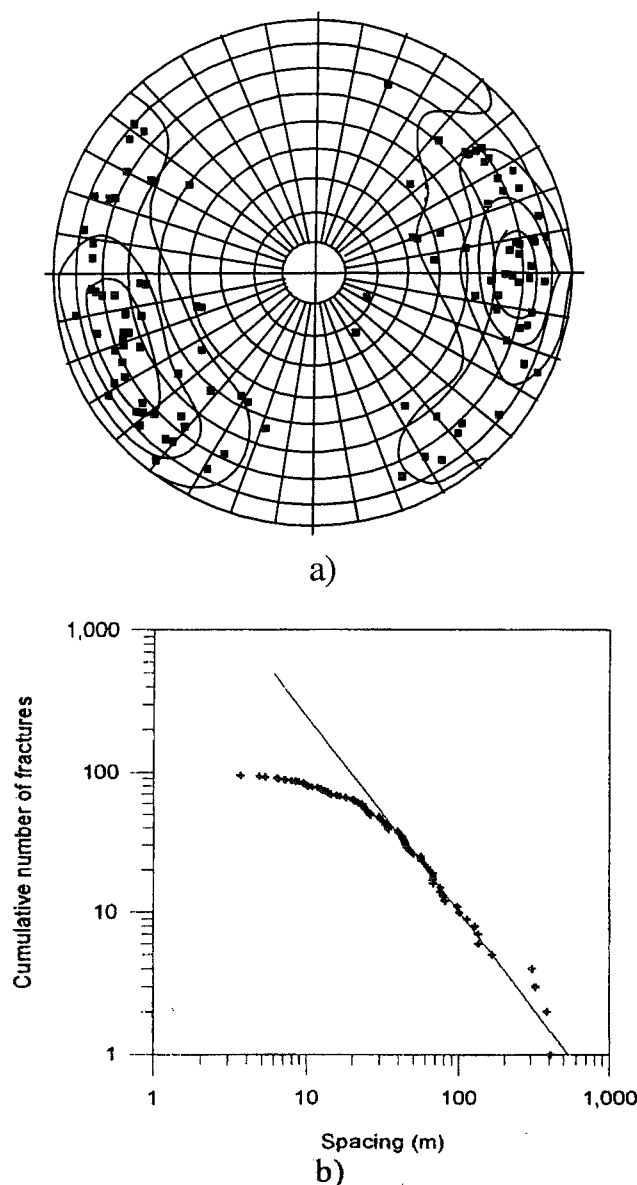


FIG. 126.- Zones fracturées à Soultz-sous-Forêts [Genter *et al.*, 1998] : a) Diagramme d'isodensité des pôles (Schmidt, hémisphère inférieure) ; b) Distribution cumulée des espacements.

L'orientation de ces zones de fractures dans les 3 puits est toujours N-S (N0°, 70°W) ou NE-SW (N150, 80°E). La distribution cumulée des espacements de ces zones fracturées montre une loi puissance, avec une pente de -1,09 [Genter *et al.*, 1998] (fig. 126).

3.2.1.3. Mésofracturation ou fracturation à petite échelle

Il s'agit des fractures d'extension décimétrique à hectométrique. On peut distinguer les fractures préexistantes au forage, de celles apparues après le forage et attribuées à la relaxation des carottes.

- Les fractures préexistantes

Genter et Traineau [Genter et Traineau, 1996] ont déduit de l'observation de carottes du puits EPS1 une base d'environ 3060 fractures orientées, sur toute la profondeur du pluton granitique. L'observation directe, beaucoup plus riche et plus fine que les diagraphies a été utilisée préférentiellement. L'acuité des outils acoustiques et électriques est moindre. Ceux-ci distinguent moins bien les familles de fractures; ces familles correspondent cependant à celles obtenues par l'observation directe. Il apparaît que la technique FMI détecte plus efficacement que le BHTV les zones de circulations de fluide dans les zones assez saines du granite [Dezayes, 1995].

Genter *et al.* [1998] donnent une classification générique des mésofractures préexistantes :

La première population est constituée de joints mineurs, métriques à plurimétriques, à fort pendage, remplis tardivement de produits hydrothermaux (chlorite et calcite). Ils sont vraisemblablement à relier à une altération pervasive à grande échelle du pluton. Sur les 3060 fractures relevées par les auteurs, 2160 sont de ce type.

La seconde population est formée de 800 fractures, d'extension métrique à hectométrique, assez fortement inclinées et montrant un jeu en cisaillement. Ces fractures correspondent au rejeu de 4% environ des joints de la première population, lors des épisodes tectoniques postérieurs à la cristallisation du pluton [Dezayes, 1995]. Les mouvements observés sont la plupart du temps obliques décrochants et normaux, assez rarement décrochants purs (0 à 20°), et rarement normaux purs. Ces fractures sont fréquemment scellées par un remplissage argileux (illite) ou carbonaté, qui peut laisser une ouverture résiduelle.

La disposition de l'ensemble de ces mésofractures est essentiellement celle de failles conjuguées subméridiennes, d'orientation N170°, tournant à N200° avec la profondeur, et à rapporter principalement à la tectonique oligocène extensive du fossé rhénan (fig. 128) [Dezayes, 1995].

- Les fractures induites ou de relaxation

Parmi les fractures relevées sur carottes, 20 % environ ont été attribuées à un phénomène de relaxation postérieur au forage. Cette fracturation de relaxation est sensiblement identique en orientation à la fracturation préexistante (fig. 129). Elle correspondrait à une fracturation latente, trouvant également son origine dans l'extension Oligocène du graben, mais dont l'expression n'aurait été possible qu'après le forage, par disparition des contraintes *in situ* [Dezayes, 1995].

Pour Genter *et al.* [1998], la relaxation est responsable de joints subhorizontaux au toit du granite. Une centaine de joints de ce type a été relevée dans EPS1, parmi 3000 fractures au total.

3.2.1.4. La microfracturation

Les inclusions fluides ont révélé des structures sous deux formes : associations en microfailles conjuguées et fentes de tension. La direction prédominante observée, N10° apparaît compatible avec à la fois la fracturation préexistante et la fracturation de relaxation (fig. 130). Les inclusions observées sont donc à rapporter à la distension Oligocène E-W. Deux autres orientations des traînées d'inclusions, N80° et N130° environ, ne sont pas corroborées par la mésofracturation.

Les traînées d'inclusions fluides pourraient constituer des zones de faiblesse privilégiée, sur lesquelles s'exprime la fracturation latente lors de la relaxation [Dezayes *et al.*, 1998].

3.2.2. Epaisseur des fractures

Du point de vue de l'ingénieur, l'exploitation géothermique suppose une circulation relativement rapide et importante du fluide entre deux puits. La question de l'épaisseur est donc cruciale, tout comme

celle de l'ouverture des discontinuités.

Il est couramment admis dans la plupart des modèles une corrélation positive entre l'épaisseur de la fracture et son extension spatiale (voir par exemple Genter *et al.* [1998]). Ceci correspond en fait à l'expression de la conservation du rapport épaisseur/surface. On observe fréquemment à l'affleurement une plus grande longueur des traces de fractures les plus larges. L'extrapolation à 3 dimensions apparaît donc justifiée.

Les épaisseurs de fractures du puits EPS1 ont été systématiquement étudiées (fig. 131) et montrent deux lois puissance.

Les épaisseurs les plus faibles, de 0,1 à 6 mm correspondent aux joints hydrothermalisés (première population décrite ci-dessus) et constituent 96% des fractures recueillies. Les fractures plus épaisses, de 6 à 250 mm apparaissent sous la forme d'un second segment, et correspondent aux fractures cisailantes uniquement (seconde population). Elles représentent 4% du nombre total des fractures du puits.

Un pour cent seulement des fractures montre une ouverture significative à l'échelle de la carotte. Le réseau de ces fractures ouvertes apparaît non connecté, indiquant que ces fractures ne sont pas hydrauliquement actives [Genter *et al.*, 1998].

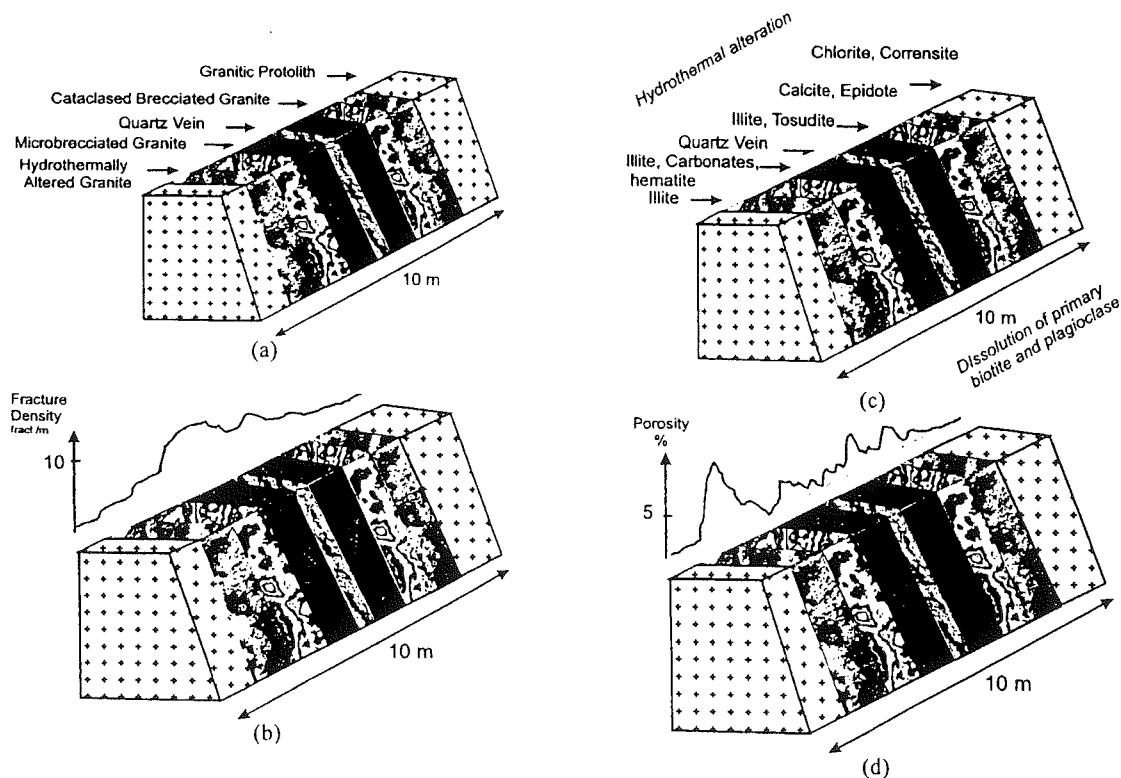


FIG. 127.- Lithofaciès d'une zone fracturée et hydrothermalisée (a) et densité de fractures correspondante (b). Séquence d'altération hydrothermale dans une zone fracturée (c) et porosité associée (d). [Genter *et al.*, 1998].

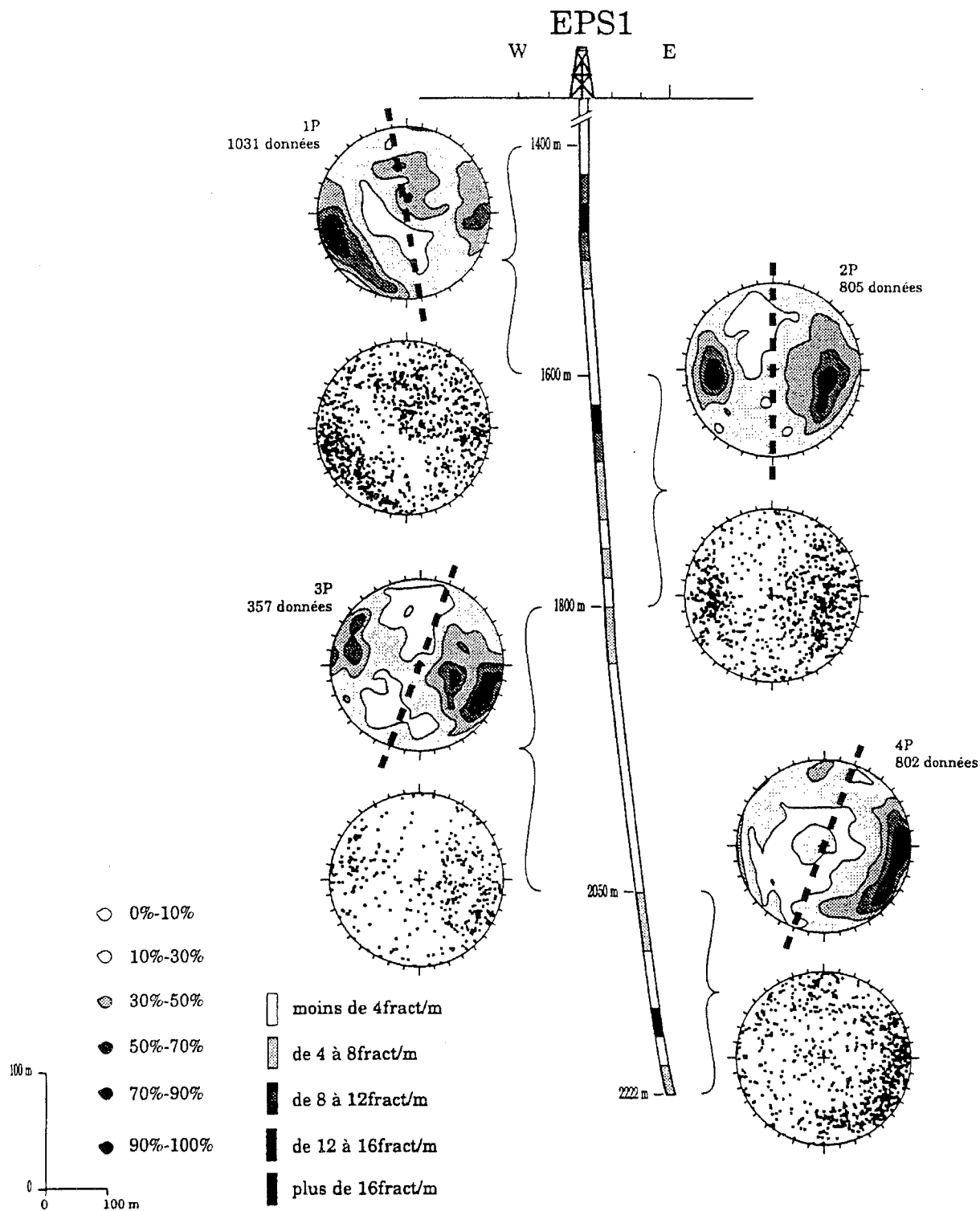


FIG. 128.- Fractures préexistantes observées sur les carottes du puits EPS1 [Dezayes, 1995].

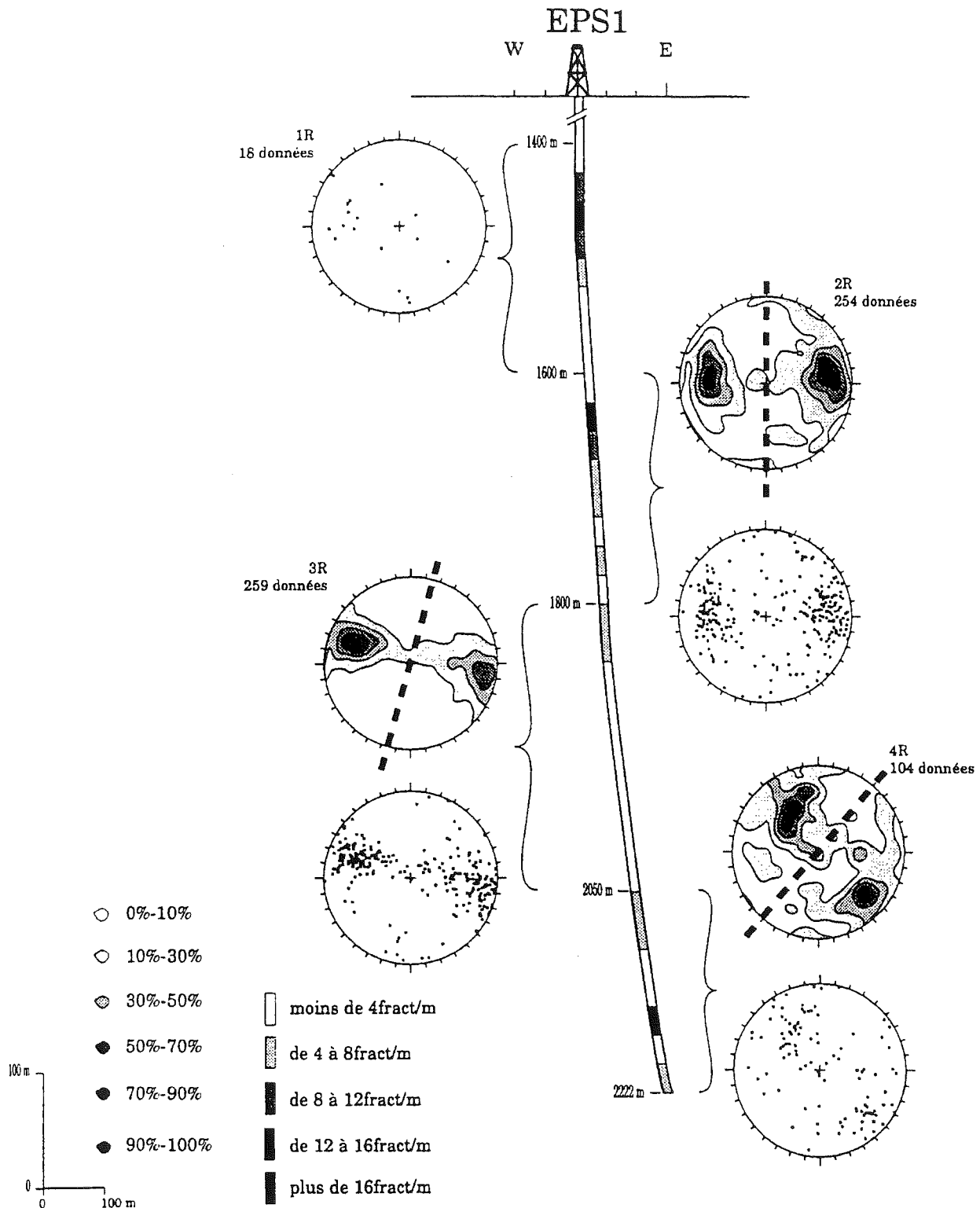


FIG. 129. – Fractures de relaxation observées sur les carottes du puits EPS1 [Dezayes, 1995].

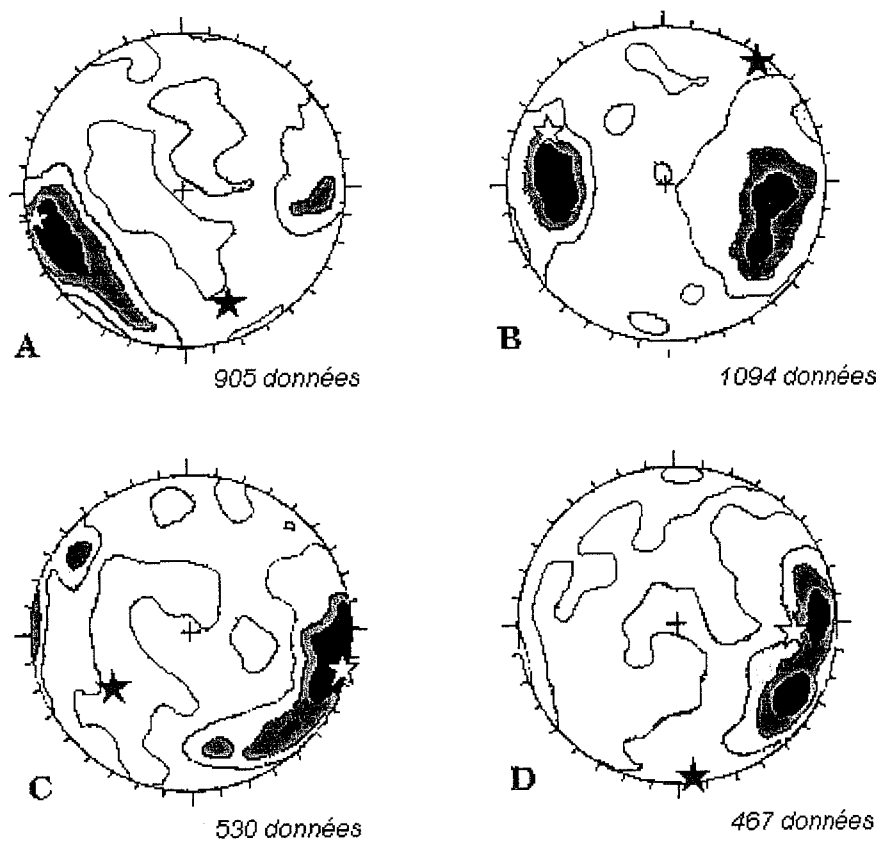


FIG. 130.– Orientations comparées des mésofractures préexistantes (courbes d'isodensité correspondant à 10%, 30%, 50%, 70% et 90% du total des fractures) et des principales familles de traînées d'inclusions fluides (étoiles) relevées dans le puits EPS1 [Dezayes, 1995]. A : Mésofractures 1410 m - 1522 m, microfractures à 1419 m ; B : Mésofractures 1522 m - 1840 m, microfractures à 1624 m ; C : Mésofractures 1840 m - 2120 m, microfractures à 2055 m ; D : Mésofractures 2120 m - 2230 m, microfractures à 2179 m.

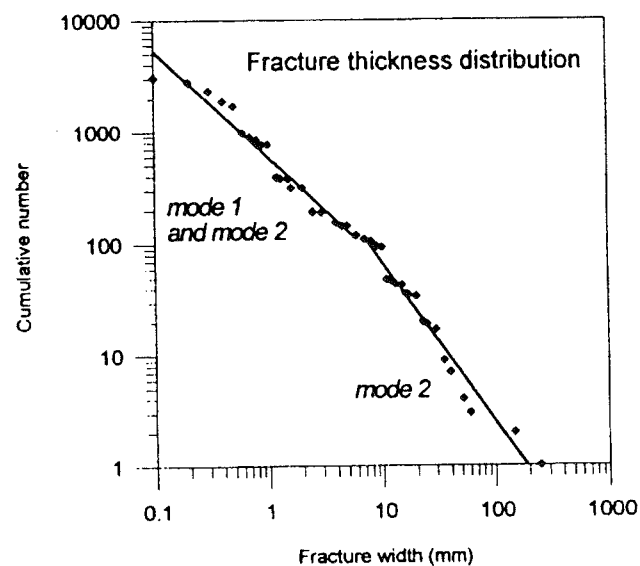


FIG. 131.– Distribution cumulée de l'épaisseur des fractures dans le puits EPS1 (d'après Genter *et al.* [1998]).

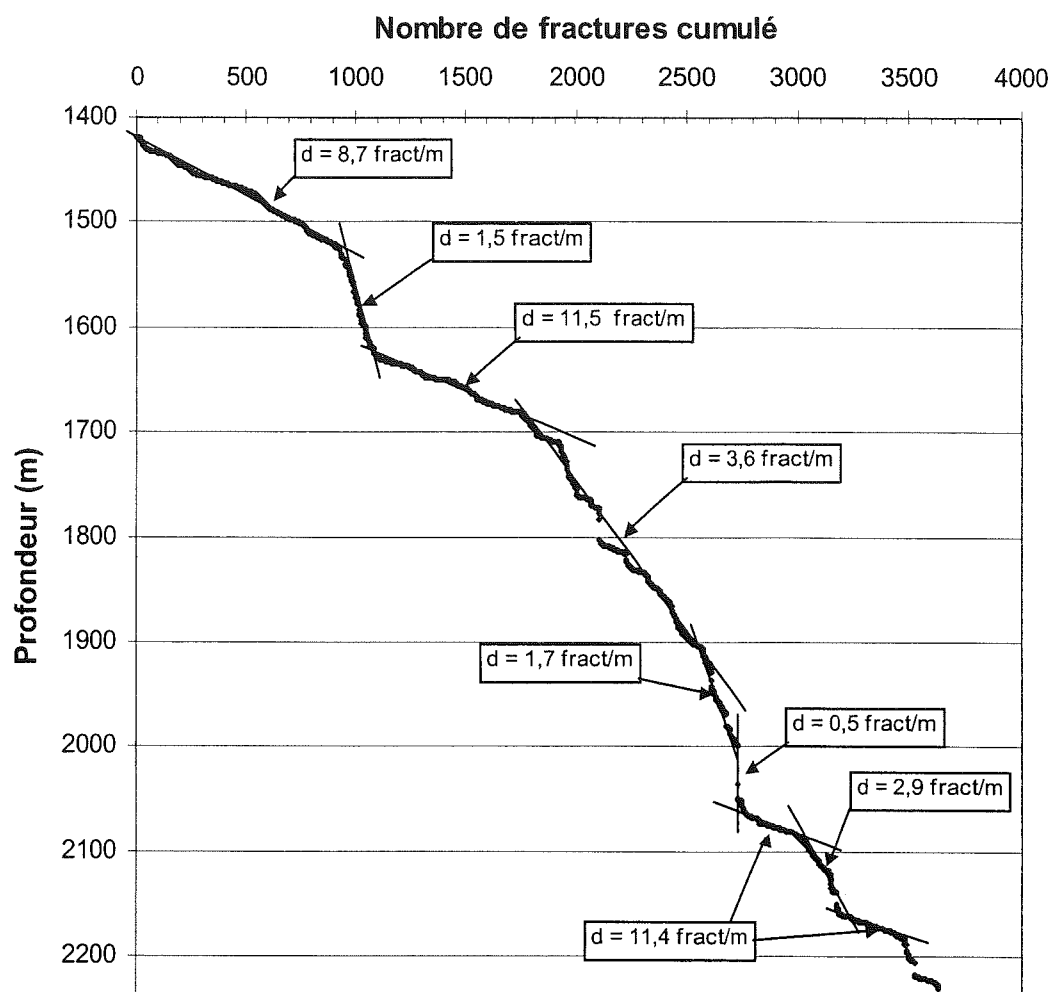


Fig. 132.- Répartition verticale des fractures relevées sur carottes dans le puits EPS1.

3.2.3. Densité des fractures

La répartition verticale des fractures a été étudiée sur carottes et par imagerie dans EPS1 (fig. 132), et seulement par imagerie mais sur une gamme de profondeurs plus importante, dans GPK1 et GPK2 (fig. 133).

Les zones les plus fracturées correspondent au granite altéré, tandis que le granite sain montre moins de discontinuités [Genter et Traineau, 1992].

A grande échelle (fig. 133), le résultat de l'interprétation des diagraphies montre une rupture de pente vers -1900 à -2000 m. La densité de fractures diminue brutalement avec la profondeur, dans un rapport de 2 à 2,5. Une explication possible de ce phénomène serait l'existence, dans la zone supérieure, d'une altération à caractère diffus et général du granite [Genter et Traineau, 1992].

A une échelle plus petite, et avec la méthode d'observation plus fine que constitue le relevé sur carottes (fig. 132), on constate que la zone supérieure révèle une alternance de zones fortement fracturées. Les zones les plus affectées par les fractures montrent une densité de fractures de 10 fractures par mètre ou plus.

3.2.4. Orientation des fractures

Les orientations des fractures relevées dans EPS1 (fig. 128) sont sensiblement les mêmes que dans GPK1 et GPK2 [Genter *et al.*, 1997]. Au-dessus de -2000 m, la direction prédominante est NNW-SSE ; elle passe à NNE-SSW en profondeur, avec une dispersion accrue.

3.2.5. Espacement des fractures

Les mesures d'espacement ont été faites dans EPS1 sur carottes et dans GPK1 par divers types d'imageries diagraphiques. Le tracé du nombre cumulé de fractures

en coordonnées bilogarithmiques montre, pour les données de l'observation directe, une courbe qui approche la linéarité sur une portion limitée à un peu plus d'un ordre de grandeur, avec une pente de $-0,90$ (fig. 134). Les données diagraphiques de GPK1, elles, montrent des courbes qui s'apparentent plus à des lois exponentielles négatives. Cette différence est peut-être due à la différence de méthode d'observation. Les courbes présentent toutes un plateau pour les petites valeurs de l'espacement ($< 0,05$ m). Il est difficile d'en déterminer la cause (sous-échantillonnage, ou encore rupture d'échelle). La tendance à la verticalisation de la courbe de distribution, pour les plus grands espacements (> 5 m) (fig. 134) est peut-être due à l'effet de taille finie de la mesure, mais il est difficile de l'affirmer.

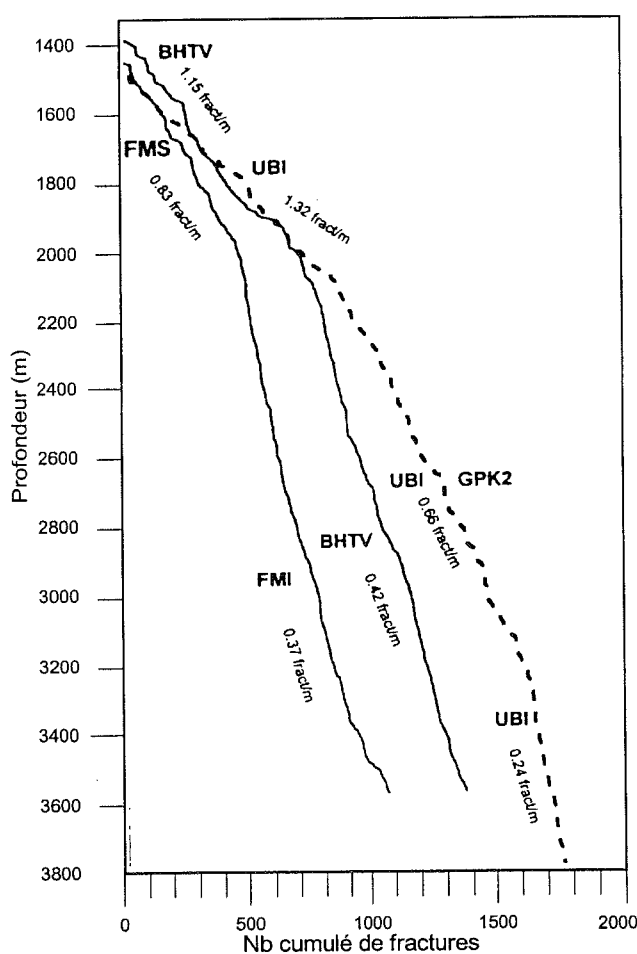


FIG. 133. – Répartition verticale des fractures dans les puits GPK1 et GPK2 [Genter *et al.*, 1998].

3.3. Les bases de notre modèle

3.3.1. Réalisation d'un découpage multiscalaire

Au-delà des travaux pétroliers qui ont établi le cadre structural général du site de Soultz, il apparaît rapidement qu'une connaissance de la fracturation

locale (fracturation dite à petite échelle) est indispensable pour rendre compte du transport fluide envisagé dans une exploitation géothermique. L'évolution de la littérature sur le sujet montre que cette connaissance tend, conformément aux besoins de l'ingénierie, à être de plus en plus précisément déterministe et descriptive, même si les données statistiques locales et régionales restent une source complémentaire incontournable [Genter *et al.*, 1998 ; Pribnow et Clauser, 1998 ; Gérard *et al.*, 1998 ; Tezuka *et al.*, 1998].

Le modèle conceptuel de Genter *et al.* [1998] annonce un style de modèles relativement novateur, faisant intervenir des données géologiques d'origine pluridisciplinaire (géologie structurale, géochimie, pétrographie, minéralogie), et touchant une grande gamme d'échelles (de la fracturation régionale à la microfracturation). Il approche de plus près la modélisation de la fracture elle-même en proposant une description physico-chimique très complète de la zone fracturée. Ce modèle conceptuel réunit un ensemble d'outils qui décrivent individuellement des aspects complémentaires de la complexité du milieu rocheux. En ce sens, il nous apparaît comme plus apte à rendre compte de la réalité.

La diversité de ces approches rend, en revanche, d'autant plus délicate la mise en application d'un tel modèle conceptuel. En effet, il faut envisager de combiner plusieurs modèles physiques, en hiérarchisant leur intervention relative. Genter *et al.* [1998] ont choisi de dissocier fondamentalement petite fracturation et fracturation à l'échelle du massif.

La fracturation à l'échelle du réservoir a été simulée géométriquement par le programme 3DEC [Genter *et al.*, 1998]. Les zones fracturées majeures des puits ont alimenté le programme, qui a proposé l'extension de ces fractures dans un certain volume, variable, autour de chaque puits. Des coupes sérieuses à travers le dispositif (fig. 135) montrent qu'une corrélation spatiale des discontinuités majeures entre les puits GPK1 et GPK2 est possible.

En ce qui concerne la petite fracturation, la plupart des auteurs se contentent d'en analyser les propriétés géométriques à travers la distribution des orientations, des espacements. Genter *et al.* [1997] tentent d'utiliser les données des formations clastiques situées dans les puits EPS1 au-dessus du massif granitique, pour contraindre dans leur modèle une fracturation stochastique à petite échelle. Ils constatent qu'il est évidemment très difficile d'inférer des éléments tridimensionnels (taille des fractures, connectivité) à partir des données 1D du puits. Ils bâtissent ainsi un modèle de la petite fracturation autour du puits, de façon complètement indépendante par rapport à la modélisation à plus grande échelle qui est faite par ailleurs.

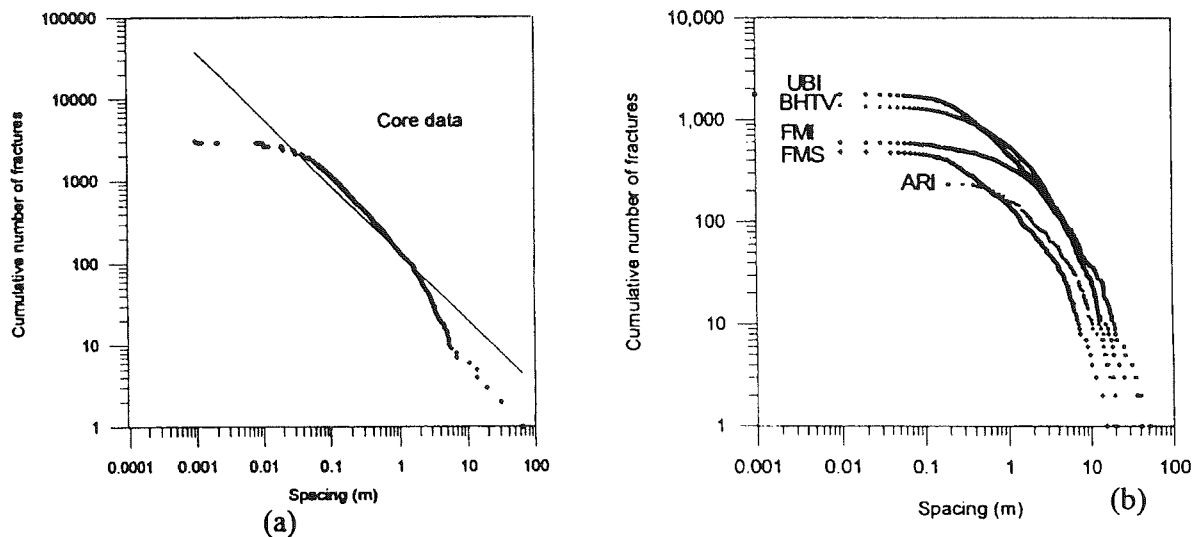


FIG. 134.— Distributions cumulées comparées de l'espacement des fractures à partir de l'observation sur carottes dans EPS1 (a), et d'imagerie diagaphique dans GPK1 (b) [Genter *et al.*, 1998].

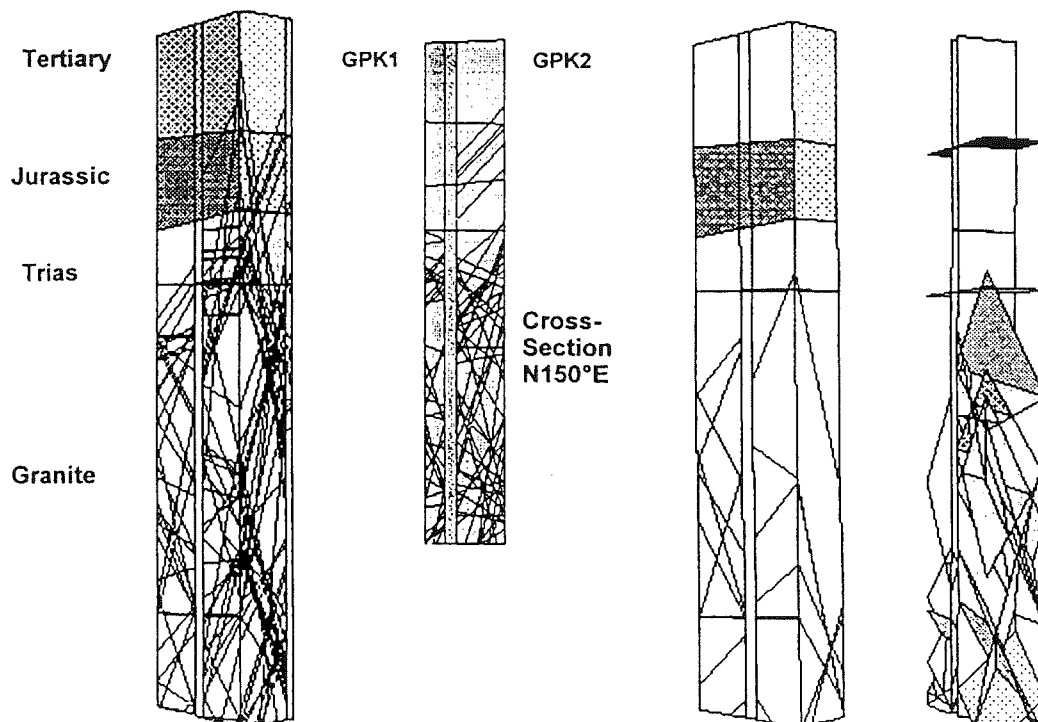


FIG. 135.— Modèle géométrique des zones fracturées à Soultz par le programme 3DEC [Genter *et al.*, 1998]. Le bloc diagramme de gauche montre le réseau de fractures pénétrant les 4 unités géologiques principales. La coupe N150°E au centre montre les possibles corrélations entre les fractures des puits GPK1 et GPK2. Les deux figures de droite représentent le réseau des fractures conductrices.

La compilation des données structurales sur les puits EPS1, GPK1 et GPK2 nous fournit quelques orientations majeures pour l'application de notre modèle dans ce contexte, que nous détaillerons maintenant.

En premier lieu, un trait important nous paraît être le fait que les fractures correspondant à deux échelles différentes doivent être représentées. La fracturation majeure peut être représentée par une population déterministe, connue par forage. La petite fracturation doit, *a minima*, répondre aux distributions statistiques observées *in situ*.

Cependant, un point important doit venir enrichir cette réflexion. Il a été établi que ces deux types de discontinuités, montrant des orientations schématiquement N-S très comparables procèdent génétiquement du même phénomène majoritaire (tectonique extensive oligocène E-W). Il nous paraît donc artificiel, dans un modèle géométrique du site de Soultz-sous-Forêts, de dissocier petite fracturation et fracturation à plus grande échelle. Plus judicieusement, il semble que ces deux sources de données devraient venir alimenter un modèle unique.

En second lieu, nous pouvons préciser la position des zones de fractures majeures. Les données de puits sont évidemment insuffisantes pour connaître l'extension latérale des fractures. Cependant, les observations de terrain permettent de conclure qu'il existe une corrélation positive entre la longueur des traces de fractures et leur épaisseur. L'extrapolation légitime en 3D porte à retenir les zones fracturées métriques à décimétriques observées dans les puits comme candidates à la fracturation grande échelle. Un argument supplémentaire dans ce sens est le remplissage hydrothermal important dont elles sont le siège, qui prouve leur connectivité avec le reste du réseau, et donc, indirectement, leur extension.

Le troisième point touche à la conception même de notre modèle. Sur le site de Soultz-sous-Forêts, on constate une bonne coïncidence des orientations structurales principales aux différentes échelles supra-métriques, mais aussi infra-métriques et particulièrement micrométriques. Les lois d'échelle couramment admises sur la fracturation sont donc vérifiées. La microfissuration, révélée par les traînées d'inclusions fluides des quartz apparaît de plus en plus comme le lieu de la fracturation latente à l'origine du phénomène de relaxation [Dezayes *et al.*, 1996 ; Dezayes *et al.*, 2000]. Elle correspond à des plans de faible cohésion, prêts à être matérialisés par des fractures, pour lesquels la suppression des contraintes *in situ* (par simple déchargement) suffit à déclencher la rupture.

Dans cette optique, nous pouvons concevoir la fracturation du granite de Soultz comme un ensemble de discontinuités en réseau, qui sont soit partiellement, soit totalement, soit éventuellement non encore exprimées, suivant l'échelle et la répartition spatiale. Selon cette approche, il nous apparaît donc raisonnable d'envisager le milieu granitique de Soultz dans son ensemble, comme un assemblage de blocs de tailles variables, limités par des fractures d'extension et d'épaisseur variables.

3.3.2. Choix des données pour le modèle

Les relevés diagrammiques qui ont été faits sur le site de Soultz peuvent être envisagés comme source pour représenter la fracturation à l'échelle du massif. Ainsi, les diagrammes acoustiques et électriques ont permis de mettre en évidence dans les puits les zones fracturées et hydrothermalisées [Genter *et al.*, 1997], qui pourront être traduites dans un modèle destiné à rendre compte de la fracturation majeure.

Cependant, dans le cadre de notre étude, la conception du modèle construit, et notamment sa propension à rendre compte des éléments discrets rend judicieuse l'utilisation des données *a priori* les plus élémentaires qui soient, autrement dit les fractures des sondages carottés. Ceci revient à choisir l'examen visuel comme outil de résolution maximale. A ce titre, le puits

d'observation EPS1, bien que relativement ancien (1990) est intéressant puisqu'il est le seul forage carotté (hormis 3,30 m de carottes supplémentaires dans le puits GPK1). Il représente donc une source de nombreuses données de fracturation, ce qui justifie son choix dans le cadre de notre modèle.

La résolution obtenue lors des relevés de fractures sur carottes est de l'ordre du centimètre. Pour prétendre réaliser une extrapolation vraisemblable de la fracturation dans une zone autour du forage EPS1, il paraît raisonnable de limiter le volume de modélisation à un rayon de quelques dizaines de mètres autour du puits EPS1. Nous avons choisi, pour la plupart de nos essais, une boîte de 50 m (Nord-Sud) x 50 m (Est-Ouest) x 50 m (verticalement), traversé axialement par le puits EPS1 (fig. 137).

La figure 132 montre une assez grande variabilité quant à la densité de fractures observée le long du puits. La zone -1820 m-1900 m montre une densité relativement constante, autour de 3,6 fractures/m ce qui est une valeur moyenne (4,4 fractures par mètre de forage sur l'ensemble de l'intervalle carotté). Par ailleurs, cette zone apparaît en carottes comme constituée de granite relativement sain, ce qui est moins vrai dans les zones plus superficielles. Dans le but de modéliser une région homogène, nous situerons verticalement notre cube dans la zone -1850 -1900 m, dans laquelle 146 fractures ont été relevées. Ces fractures sont listées dans le tableau de la figure 136.

La figure 138 donne la répartition de ces fractures dans la zone étudiée, et la figure 139 la loi des orientations.

3.3.3. Orientation des discontinuités

A partir des 140 failles striées relevées dans le forage EPS1, il a pu être établi une hypothèse sur la succession des événements tectoniques [Dezayes, 1995], qui se résume sommairement pour le secteur étudié par :

- décrochements conjugués sénestres NE-SW et dextres NW-SE à l'Eocène supérieur (33 observations sur 140),
- extension générale importante à l'Eocène terminal et Oligocène (36 failles normales), et enfin
- décrochement NE-SW général dans le graben (18 décrochements). [Dezayes, 1995] (fig. 140B)

Cependant, le nombre de failles (140) est relativement faible en comparaison des 3631 fractures observées. Par ailleurs, le diagramme d'isodensité des fractures observées sur le même segment dans le puits EPS1 (fig. 140A) montre une orientation privilégiée, subméridienne. La compression Néogène NW-SE, toujours actuelle, et qui apparaît plutôt WNW-ESE dans le granite de Soultz [Dezayes, 1995] fait figure de phase dominante et semble responsable de cette orientation. Les joints correspondent donc en première

Profondeur (m)	Dir. Plongement (°)	Plongement (°)	Profondeur (m)	Dir. Plongement (°)	Plongement (°)
1850,1	286	25	1876,1	313	74
1850,4	298	79	1877,0	259	54
1850,6	287	72	1877,0	304	40
1850,9	8	82	1877,1	334	79
1851,5	286	39	1877,3	315	78
1852,0	218	44	1877,3	322	79
1852,3	293	43	1878,1	101	67
1852,4	228	42	1878,7	294	62
1853,2	206	40	1881,0	82	63
1853,6	291	84	1881,4	131	64
1854,2	111	58	1881,5	284	42
1854,9	105	64	1882,3	295	81
1855,0	103	63	1882,4	35	89
1855,1	292	75	1883,0	240	88
1855,3	117	50	1884,4	123	73
1855,4	274	85	1885,9	260	50
1855,4	283	77	1886,0	279	62
1855,8	109	74	1886,1	246	69
1855,8	128	49	1886,3	246	61
1856,7	220	34	1886,6	248	62
1856,7	97	89	1886,7	221	68
1856,9	235	33	1886,8	235	63
1857,2	302	87	1887,0	238	43
1857,2	283	82	1887,2	297	79
1857,3	294	79	1887,4	293	63
1857,6	279	87	1887,6	321	71
1857,9	276	85	1887,7	19	41
1858,1	126	74	1888,0	64	88
1858,1	141	63	1889,0	110	54
1858,6	126	73	1890,4	174	66
1858,6	120	65	1890,5	129	24
1858,7	125	56	1890,6	134	29
1858,7	288	89	1891,1	231	29
1858,8	133	74	1891,1	257	72
1858,9	214	14	1891,8	104	42
1859,0	121	78	1892,3	267	39
1859,5	130	83	1892,4	267	41
1859,5	309	87	1892,8	118	55
1859,6	103	80	1893,1	275	31
1859,7	115	68	1893,2	262	30
1860,1	237	28	1893,3	110	56
1860,1	231	35	1893,6	284	61
1860,3	244	42	1893,7	265	46
1860,3	285	57	1893,8	282	72
1860,7	288	74	1893,9	267	67
1861,0	295	89	1894,2	24	50
1861,0	301	52	1894,3	277	47
1861,2	110	62	1894,3	284	45
1861,3	281	80	1895,1	282	62
1861,4	288	73	1896,1	281	36
1861,6	117	71	1896,1	114	74
1861,7	117	63	1896,3	292	43
1861,8	246	33	1896,4	275	44
1862,0	300	83	1896,9	266	53
1863,5	223	52	1897,1	280	63
1863,9	193	85	1897,3	297	67
1865,1	333	78	1897,5	277	74
1865,1	342	72	1897,6	279	69
1865,2	335	76	1897,7	278	72
1865,3	349	77	1897,9	334	74
1869,7	128	33	1898,1	284	19
1870,2	107	73	1898,2	183	8
1870,5	328	49	1898,3	339	10
1872,0	291	80	1898,8	273	55
1872,4	117	80	1898,8	298	81
1873,2	111	78	1899,0	278	40
1874,5	100	64	1899,0	165	11
1874,9	98	87	1899,1	118	11
1875,0	113	68	1899,2	82	18
1875,1	277	87	1899,2	118	72
1875,5	301	73	1899,5	139	8
1875,6	64	79	1899,6	297	58
1876,0	10	54	1899,7	60	1

Fig. 136.- Liste des 146 fractures du puits EPS1, entre les profondeurs -1850 m et -1900 m, prises en compte dans le modèle.

approximation à une famille d'orientations unique, et l'établissement d'une chronologie pour ces fractures paraît très difficile. Nous considérerons donc pour la suite que l'orientation des joints n'a pas varié significativement au cours du temps, et que nous ne possédons pas les données pour argumenter un phasage génétique dans notre modèle.

Néanmoins, il apparaît à travers diverses études que la phase principale de fracturation correspond à la période d'extension oligocène dont résulte la très large majorité des fractures.

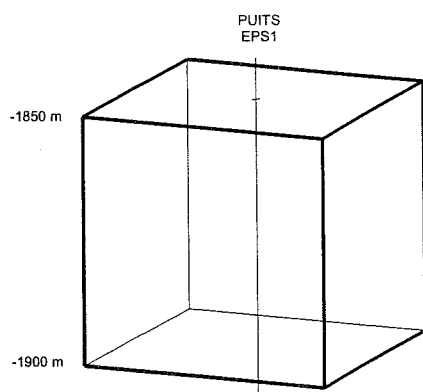


FIG. 137.- Volume de modélisation cubique autour du puits EPS1.

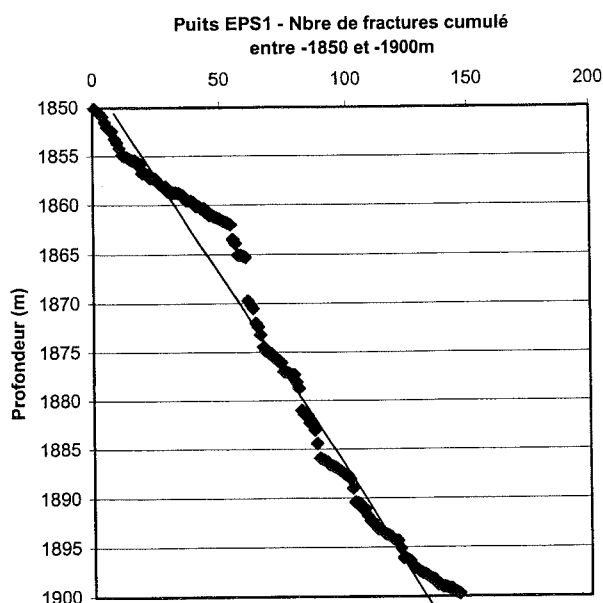


FIG. 138.- Répartition des 146 fractures dans le puits EPS1 entre -1850 m et -1900 m. La densité de fractures sur la portion de puits étudiée est d'environ 3 fractures par mètre.

En conclusion, il semble qu'en première approximation, rien ne s'oppose à l'application d'un modèle de blocs pour représenter la fracturation dans le granite de Soultz-sous-Forêts. Nous examinons maintenant quelles voies peuvent être retenues pour contraindre le modèle.

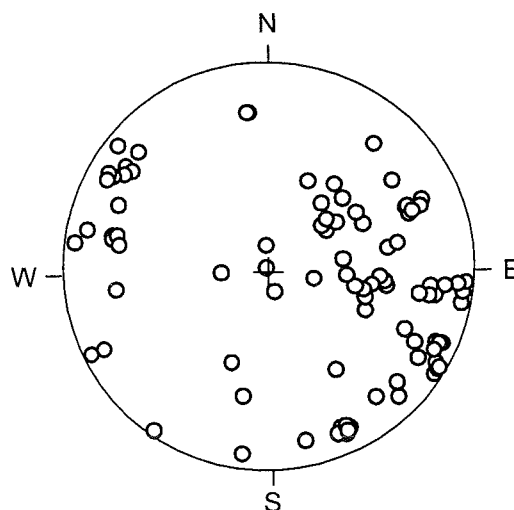


FIG. 139.- Loi d'orientation des 146 fractures dans le puits EPS1 entre -1850 m et -1900 m.

4.- ELABORATION PRATIQUE DE MODÈLES APPLICABLES AU CAS DE SOULTZ

4.1. Problématique

Le but des modélisations à diverses échelles faites à Soultz est l'approche de la rentabilité économique du gisement géothermique (voir par exemple Bourrelrier [1998]). Un point important est que l'on considère ici le site naturel intact, avant la fracturation hydraulique induite par l'injection de fluide.

Dans l'optique qui nous concerne d'une modélisation purement géométrique, la connaissance de la fracturation locale est évidemment essentielle pour l'amélioration du rendement du dispositif, sous deux aspects complémentaires.

D'une part, la fracturation du réservoir influence sa capacité volumétrique, mais aussi sa capacité thermique par la surface que les fractures offrent à l'échange de chaleur ; le débit de circulation dépend du degré d'interconnexion entre les puits, donc de la connectivité du réseau.

D'autre part, la fracturation périphérique, autour des puits de forage, conditionne la perméabilité dans le puits d'injection. La fracturation hydraulique artificielle vise à améliorer les valeurs de ce paramètre, pour accroître les volumes de circulation.

La fracturation ne peut être connue de façon déterministe que le long de profils de forage. La réalisation d'un modèle de fracturation dans un certain volume autour de ces puits de forage suppose que l'on réalise dans ce volume un nombre important de fractures,

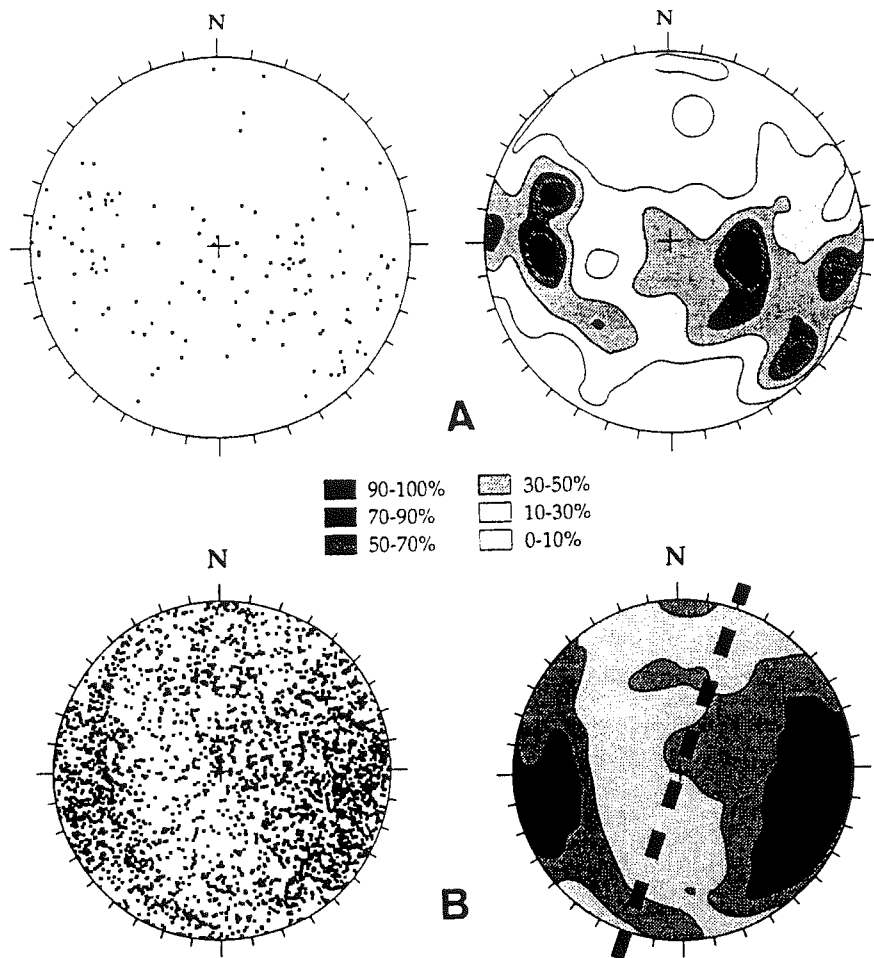


FIG. 140.— Fracturation observée sur les carottes du puits EPS1 (d'après [Dezayes, 1995]. A : Pôles de fractures et diagrammes d'isodensité des 140 failles. B : Pôles de fractures et diagrammes d'isodensité des 2996 fractures préexistantes.

pour lesquelles il n'existe pas de relevés déterministes. On aura donc nécessairement recours à des données statistiques pour contraindre l'élaboration des modèles.

Deux grands types de contraintes ont été jugés fondamentaux dans notre modèle.

Il s'agit : d'une part de l'attitude des plans de fracture locaux et régionaux, connue statistiquement par le contexte structural, mais aussi de façon déterministe dans les puits, et d'autre part de la répartition spatiale de la densité de cette fracturation.

Notre objectif est de réaliser un ou plusieurs modèles en accord avec ces deux types de contraintes, que nous examinerons successivement.

4.2. Réalisation de la coïncidence géométrique entre fractures imposées et fractures " périphériques " : la contrainte de puits

En l'absence d'arguments forts contraires, nous supposons donc que tous les joints de notre modèle possèdent globalement des orientations issues d'une même loi, et ceci tout au long du processus de génération.

Le moteur de notre modèle puisera donc les orientations des fractures générées dans le même ensemble de valeurs. Ceci s'applique aux fractures imposées, ou « de position », observées sur le profil des puits. Ceci s'applique également aux fractures représentatives du contexte local (fractures « périphériques »).

4.2.1. Le problème et ses deux solutions

La mise en œuvre dans le moteur comporte une difficulté essentielle, qui concerne la cohabitation géométrique au voisinage du puits, entre les fractures imposées, issues d'un « germe » connu de façon déterministe, et les fractures périphériques, dont la position (X, Y, Z) n'est donnée a priori que stochastiquement.

Dans une première approche, on pourrait considérer que les fractures imposées s'étendent autour du puits dans une zone cylindrique de rayon moyen R. Au-delà de cette zone, le régime de génération des fractures par le moteur est différent. Même s'il faut noter que

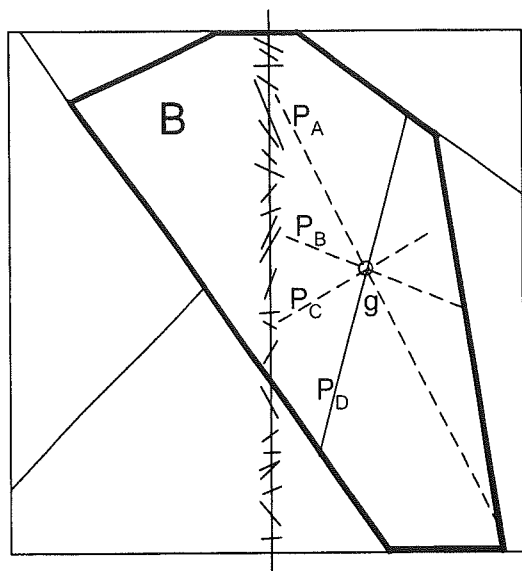


FIG. 142. – Illustration de la contrainte imposée lors du tirage du plan d'une fracture locale dans le but de couper le bloc B. Etant donné le germe g, le tirage des plans P_A , P_B et P_C n'est pas satisfaisant car ces plans coupent le puits. Le plan P_D , lui, peut être retenu.

Cette « contrainte de segment vide » s'applique aux fractures périphériques qui découpent tout bloc traversé par un segment sur lequel on souhaite reproduire les observations, que ces fractures soient recoupantes ou non. Son effet sera très visible dans les premiers stades du découpage, sur les gros blocs traversés par le puits (fig. 143).

Cette solution distingue artificiellement deux zones, le « couloir » du puits et le reste du volume. Il nous faudra donc minimiser l'« effet de couloir ». Deux paramètres sont apparus comme ayant un rôle majeur dans ce domaine. Il s'agit en premier lieu du type de simulation utilisé (A ou B), et en second lieu de l'extension relative des fractures imposées par rapport aux autres fractures.

4.2.3. Impact de la chronologie relative des deux types de fractures sur l'effet couloir

Une approche pour réduire l'effet de couloir consistera à distribuer judicieusement les fractures dans les deux zones. De par la conception du moteur, les fractures sont réalisées une par une. Pour chaque fracture à générer, on choisit en premier lieu son type (imposée ou locale). Trois scénarios ont été étudiés :

- Scénario « Fractures imposées finales »

La simulation réalise toutes les fractures périphériques, et se termine par les fractures imposées ;

- Scénario « Fractures imposées initiales »

Les fractures imposées sont toutes générées en début de simulation ; les fractures périphériques ensuite ;

- Scénario « Fractures imposées réparties »

Les fractures imposées sont distribuées uniformément parmi les fractures périphériques.

Notons que ce dernier cas est pratiquement équivalent, pour un grand nombre de fractures, au tirage aléatoire du type de fracture (cas où les fractures imposées seraient générées aléatoirement parmi les fractures périphériques).

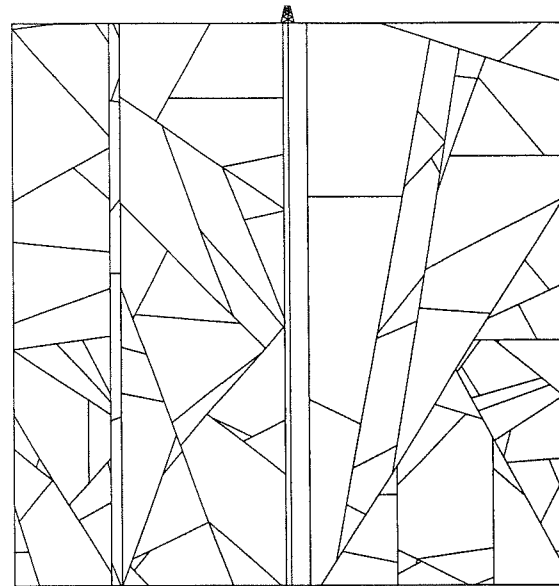
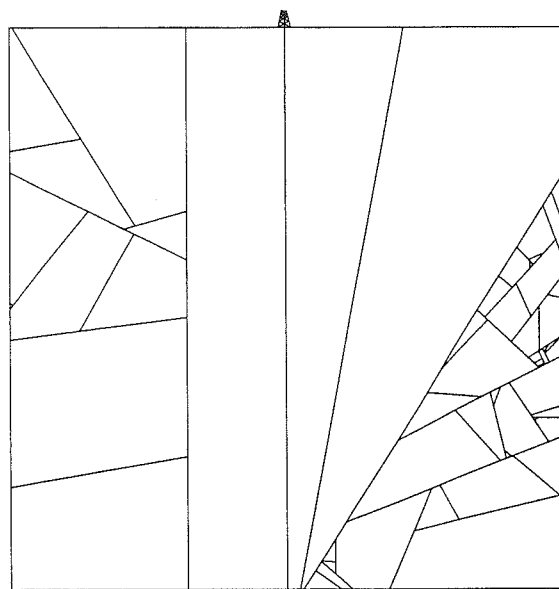


FIG. 143. – Deux exemples de l'effet de la « contrainte de segment vide ». Simulations dans un cube de 50 m d'arête traversé verticalement par le puits EPS1, pour z entre -1900 m et -1850 m. Les simulations comportent 500 fractures périphériques non recoupantes, et aucune fracture imposée. En haut, simulation de type A (bloc aléatoire) ; en bas simulation de type B (position aléatoire du germe). La zone du puits est cloisonnée précocement par des fractures subverticales. Du fait du processus de tirage aléatoire des coordonnées du germe, le « couloir » ainsi formé autour du puits est plus étroit dans le cas B, à nombre de fractures égal.

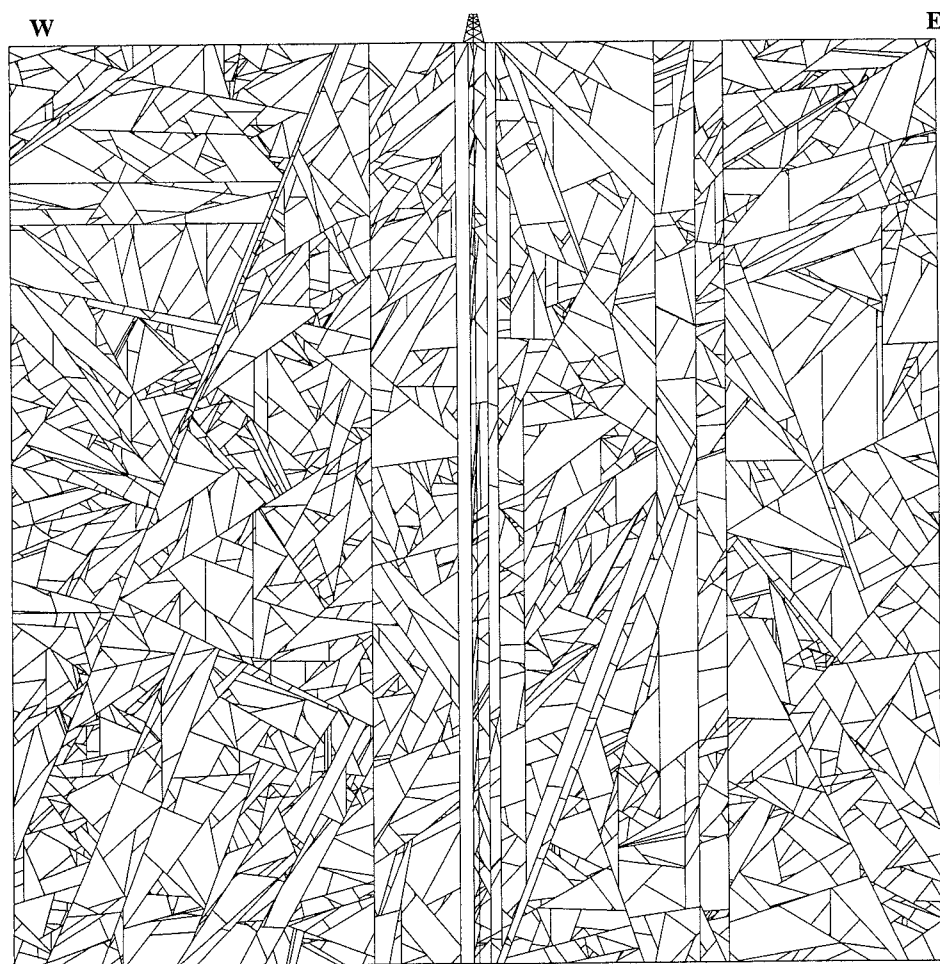


FIG. 144.— Simulation de 70 000 fractures dans un volume de 50x50x50 m, autour du puits EPS1 pour des profondeurs entre -1850 et -1900 m. Coupe verticale W-E passant par le puits. Les 146 fractures relevées visuellement sur carottes dans le puits sont représentées. Scénario « Fractures imposées finales » : Une phase de type B (20000 fractures), est suivie d'une phase de type A (49860 fractures périphériques, puis les 146 fractures imposées. Représentation réalisée avec AutoCAD.

Dans le scénario "Fractures imposées finales", on structure les fractures périphériques autour du puits, et l'effet de segment vide est donc maximal. En confinant les fractures imposées, on limite artificiellement leur extension. Ce cloisonnement rend ce scénario mal adapté (fig. 144).

Si l'on génère a priori les fractures imposées, on leur permet au contraire une extension maximale. On observe ainsi dans la plupart des simulations effectuées à partir des données d'EPS1 (profondeurs -1850 à -1900 m) une prédominance autour du puits des accidents subverticaux de grande ampleur, donnant un effet "croisillon" (fig. 145).

Ces résultats plaident en faveur du scénario que l'on pouvait naturellement attendre, dans lequel les fractures imposées sont réparties uniformément parmi les fractures périphériques.

En conclusion, nous montrons la nécessité

géométrique de "mélanger" chronologiquement la création des fractures présentant une intersection avec le puits, avec celles qui ne le recoupent pas. On assiste donc à deux effets extrêmes: l'effet "couloir" lorsque les fractures du puits sont créées trop tardivement dans le modèle, et l'effet "croisillon" lorsqu'elles apparaissent précocement. Les fractures initiales définissant la découpe majeure du bloc modélisé, il convient donc de choisir celles que l'on doit créer au début du processus de modélisation avec le maximum de critères de confiance.

4.2.4. Impact du type de génération

Une vingtaine de simulations ont été réalisées selon les bases décrites au paragraphe 3.3.2.

Dans la première partie de l'étude, une même méthode de génération de fractures (processus A, B, C ou D décrits dans notre Seconde Partie) est utilisée tout au long de chaque simulation.

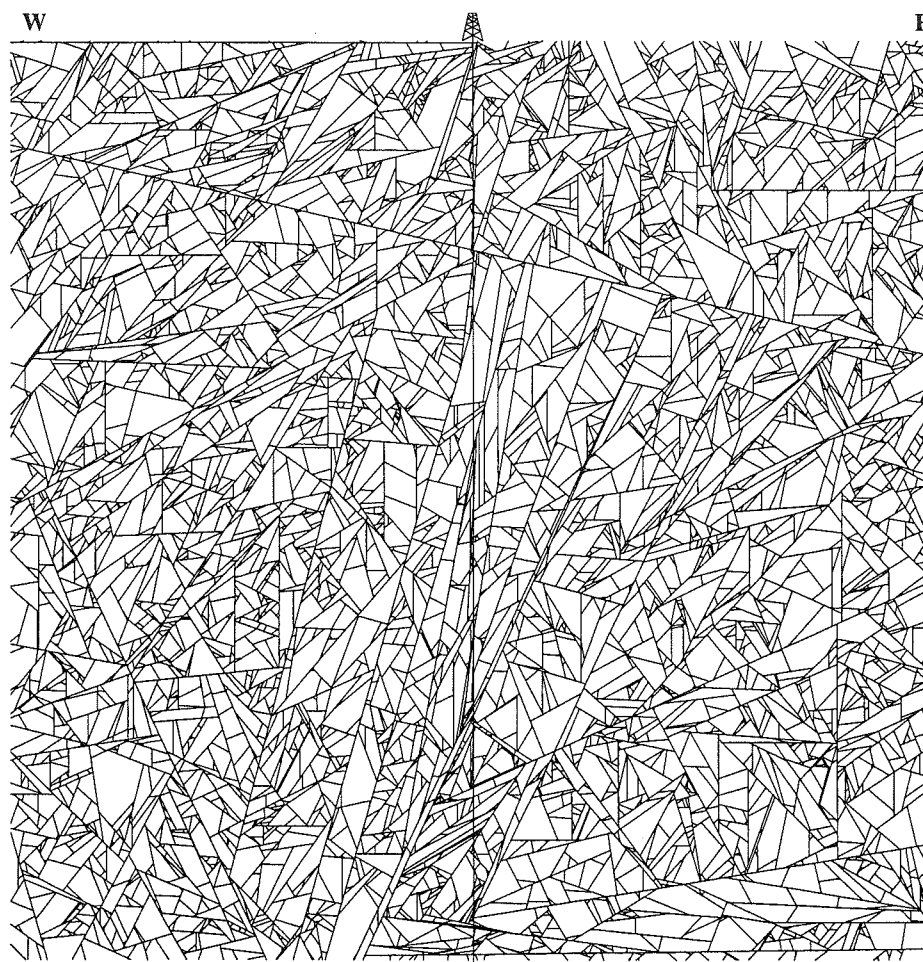


FIG. 145.- Simulation de 120 000 fractures dans un volume de 50x50x50 mètres, autour du puits EPS1 pour des profondeurs entre -1850 et -1900 m. Scénario « Fractures imposées initiales ». 47000 fractures de type B, dont les 146 fractures imposées, puis 73000 fractures de type A. Coupe verticale W-E passant par le puits. Le puits est matérialisé par le segment vertical et montre la totalité des 146 fractures relevées. Il apparaît visuellement un effet de « croisillon ».

4.2.4.1. Générations à processus unique

Processus de type C et D

Rappelons les algorithmes utilisés dans les processus de type C et D (cf. Deuxième Partie). Dans ces deux mécanismes, chaque bloc élémentaire a une probabilité p d'être divisé. La probabilité p est constante quel que soit le stade de la fragmentation du modèle. Parmi les N_i blocs élémentaires présents à chaque stade i , on tire donc au hasard $N_i p$ blocs pour les diviser. Ces deux mécanismes ont été qualifiés dans notre propos de processus de fragmentation « en salves ».

Dans le processus C, les $N_i(1-p)$ blocs restants qui n'ont pas été fracturés au stade i sont définitivement retirés du processus et ne pourront donc plus être divisés. Il s'agit donc d'un tirage sans remise.

Dans le processus D, les $N_i(1-p)$ blocs non fracturés

au stade i sont remis en jeu au stade $i+1$ et pourront faire l'objet d'une division dans les stades ultérieurs (tirages bernoulliens).

Les protocoles de génération de type C et D ont été utilisés pour tenter d'obtenir des coupes montrant une coïncidence acceptable entre fractures imposées et fractures périphériques. Dans les deux cas, et pour toutes les simulations effectuées, on a observé, sur les coupes verticales passant par le puits, un hiatus très important entre la zone située dans le puits et à proximité immédiate du puits d'une part, et le reste du volume modélisé d'autre part. Avec un petit nombre de fractures, ce phénomène est extrême. Pour un plus grand nombre de fractures, on obtient en coupe des figures comparables à celles obtenues avec un processus de type A décrit ci-après (voir figure 147). Nous sommes donc conduits à écarter ces deux types de processus pour le reste de l'étude.

Processus de type B

Dans l'algorithme utilisé par le processus B, on tire un germe aléatoirement dans le volume modélisé. A partir de ce germe, on étend ensuite une fracture qui coupe le bloc de volume minimale contenant ce point.

Dans les simulations correspondantes, les résultats montrent une certaine incompatibilité entre la maille assez régulière générée dans les fractures périphériques, et l'espacement très faible des fractures imposées dans les zones fracturées du puits. En effet, pour un nombre trop faible de fractures périphériques, la zone du puits montre une densité de fractures trop forte (fig. 146A).

On peut alors augmenter le nombre des fractures périphériques, de façon que la maille moyenne obtenue en coupe se rapproche de la distance interfracturale minimale sur le puits. On observe alors dans la zone du puits l'apparition de lacunes, ou zones non fracturées, absentes dans le reste du volume (fig. 146B).

En augmentant encore le nombre de fractures, donc en resserrant la maille du réseau, la nécessité de reproduire les lacunes le long du puits provoque dans ces zones de lacunes une verticalisation des fractures (fig. 146C). Ce phénomène tend à s'accroître lorsque le nombre de fractures s'accroît. Pour cette raison, la méthode de découpage B semble insuffisante pour rendre compte, seule, de la distribution des distances interfracturales le long du puits.

Ce résultat laisse penser que le protocole de fragmentation de type A pourrait être plus adapté pour générer un contraste de tailles de mailles important.

Processus de type A

Rappelons que dans le processus A, le bloc à fragmenter est tiré aléatoirement.

Cinq simulations ont été effectuées de cette façon, les autres paramètres étant laissés inchangés par ailleurs. On observe, dès les 30 000 premières fractures générées dans le volume cubique, l'installation de domaines à plus forte densité de fracturation, qui persistent pour des nombres de fractures supérieurs (fig. 147). En l'absence d'autre contrainte, la position de ces amas (*clusters*) de fractures est a priori aléatoire, comme l'est la position des plans de fracture. Cependant, le processus de A tend à accentuer la fragmentation des zones déjà divisées. Or, la contrainte de position, en imposant un certain espacement des plans de fractures le long du puits, contraint indirectement la taille des blocs le long de ce profil. Il en résulte donc une division anormalement importante des blocs dans l'axe du puits (fig. 147). Pour cette raison, il paraît difficile d'utiliser ce procédé isolément pour obtenir une distribution homogène.

Pour conclure, les processus A et B s'avèrent incapables isolément de schématiser une fragmentation homogène vraisemblable à l'échelle du volume de

modélisation. La seule distribution linéaire des fractures le long d'un profil met ainsi en échec ces hypothèses simples. Les mécanismes simples de génération aléatoire de fractures dans des blocs tirés aléatoirement (A) ou dans l'ensemble du modèle (B) ne peuvent pas rendre compte de la séquence du puits. Étant donné la complexité des contraintes en jeu dans la réalité, ce résultat n'est pas surprenant, et se justifie par le fait qu'on ne puisse pas réduire à l'un ou l'autre de ces processus élémentaires, la complexité du phénomène de fragmentation du milieu rocheux.

4.2.4.2. Générations à processus combinés

S'il faut renoncer à utiliser exclusivement l'un ou l'autre des procédés A et B, il nous a paru intéressant d'examiner un scénario de fragmentation mixte, faisant appel alternativement à deux mécanismes, dans des proportions variables.

Diverses tentatives ont été réalisées. Les résultats les plus réalistes ont été obtenus de la façon suivante.

Le découpage de type B a été utilisé pour structurer initialement l'assemblage de blocs. On trouvera dans la deuxième partie de ce travail diverses images de réseaux de type B, à mailles plutôt régulières.

Le découpage de type A, peut alors, sur un volume ainsi fracturé, facilement rendre compte des amas de fractures observés le long du puits (fig. 148 et 149).

Cependant, une fragmentation de type A trop poussée augmente rapidement l'écart type de la taille des mailles. On obtient alors rapidement des figures présentant un aspect analogue à la figure 147. Il est possible alors de corriger cet effet par un « rééquilibrage » périodique en utilisant le mécanisme de type B.

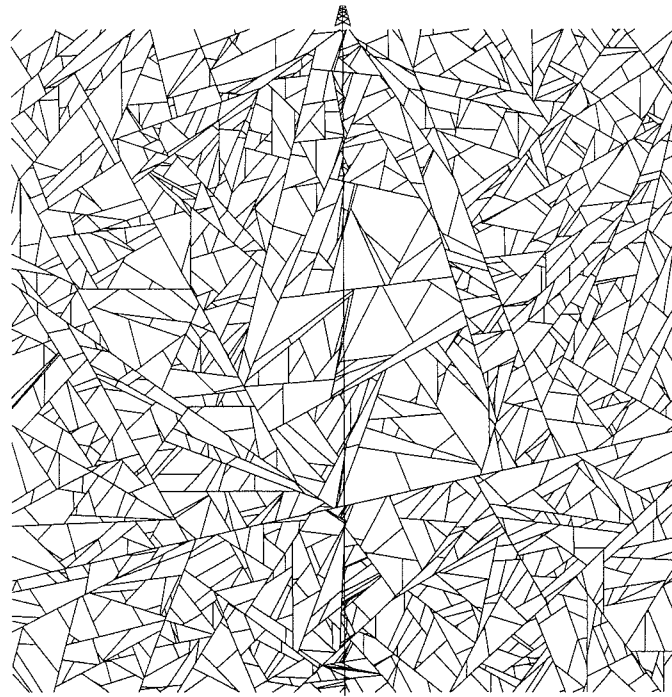
C'est ce dispositif que nous retiendrons pour la suite de l'étude.

4.2.5. Détermination du nombre de fractures à créer dans un volume donné

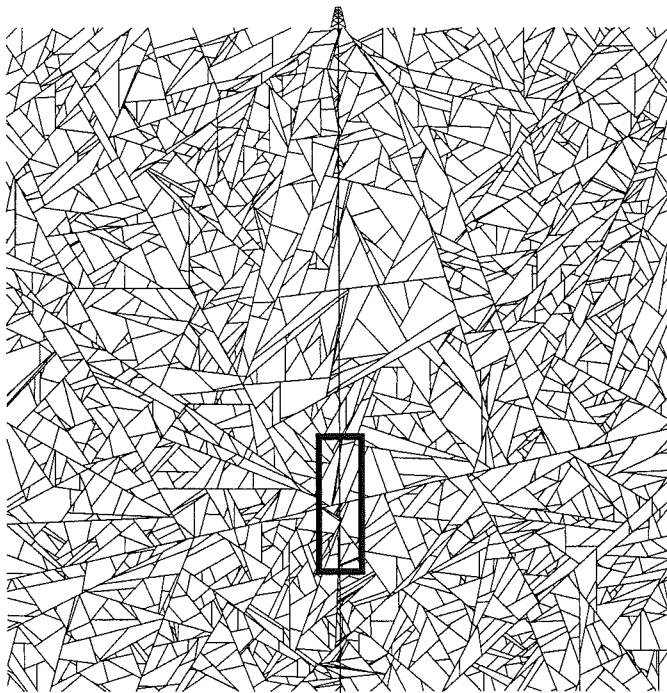
L'évaluation de la stabilité de la répartition des fractures à travers le modèle est complexe. Quelle contrainte imposer au moteur pour minimiser l'effet de couloir qui fait apparaître un contraste de densité le long du profil du puits ?

Une approche théorique pourrait être tentée en cherchant à exprimer le nombre de fractures à générer : étant donné un puits comportant un nombre N_F de fractures forcées, et traversant axialement un domaine D cylindrique (ou parallélépipédique), il s'agirait de déterminer le nombre N_L de fractures " périphériques " à générer dans ce domaine D.

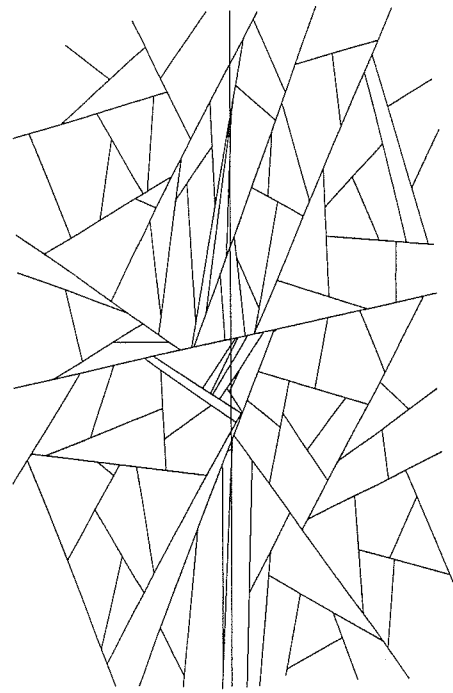
Cette voie théorique étant complexe, on peut tenter d'estimer empiriquement ce nombre N_L par appréciation



A)



B)



C)

FIG. 146.— Illustration de l'inefficacité des simulations de type B (germe aléatoire) pour rendre compte des fractures imposées. Simulation réalisée dans un bloc cubique de 50m d'arête, traversé verticalement en son centre par le puits EPS1 entre -1850 et -1900 m. Coupes verticales W-E passant par le puits. La totalité des 146 fractures imposées relevées sur carottes est figurée. Pour 20000 fractures (A), comme pour 100000 fractures (B), la relative régularité de la maille dans les zones présente un contraste avec l'irrégularité des mailles situées le long du puits. En (C), poursuite de la création de fractures autour d'une portion réduite du puits (encadrée sur la figure B). Les fractures bordant les zones de lacune du puits ont tendance à se verticaliser.

visuelle des coupes, pour un volume de modèle donné, en fonction de la densité linéaire dans le puits N/L (nombre de fractures par unité de longueur). Cette méthode permet de comparer la taille des mailles sur le

trajet du puits et dans le reste du volume. Les valeurs de densité acceptables sont telles qu'il y a dans le modèle une certaine homogénéité de taille de maille (fig. 151).

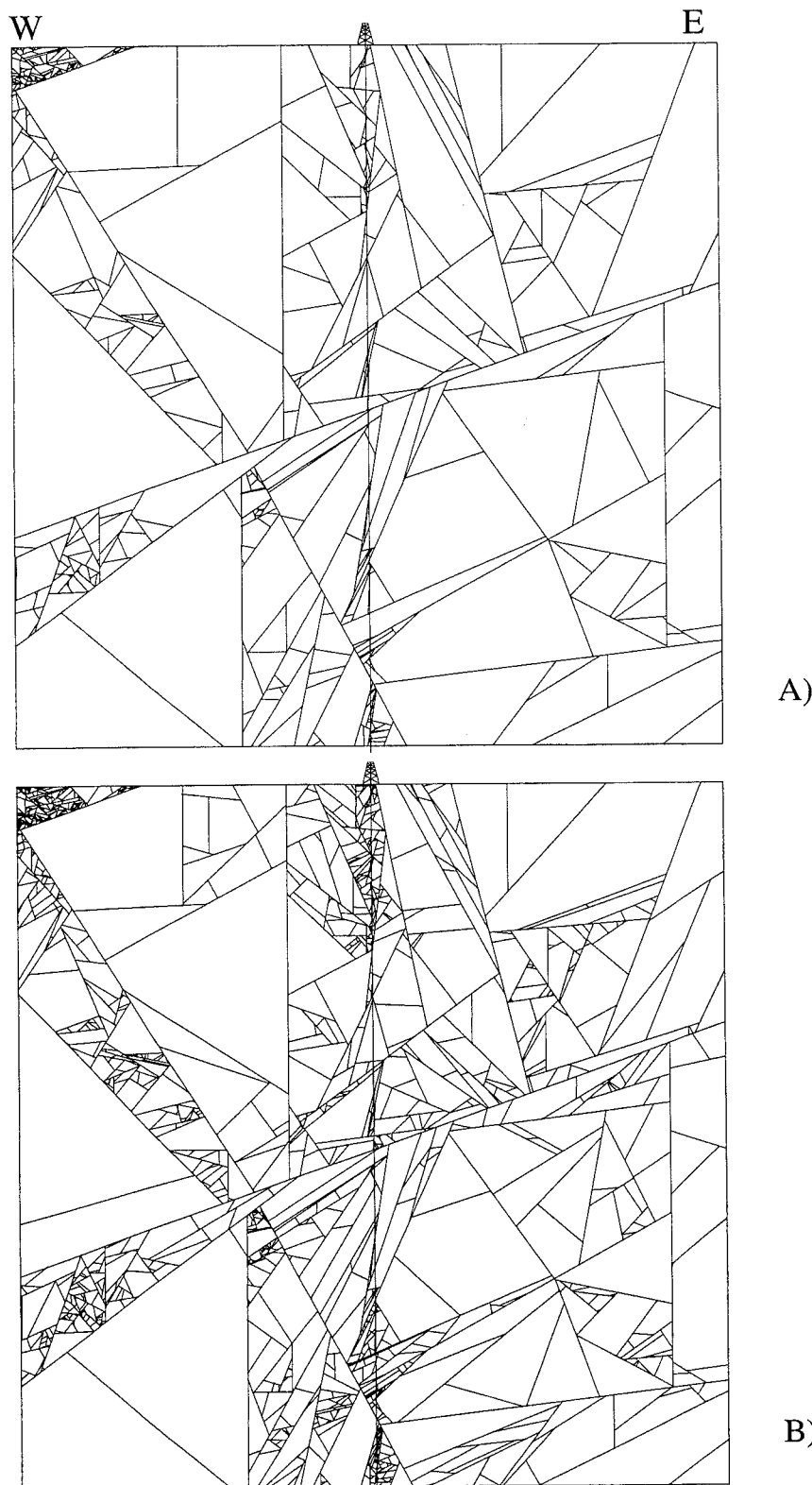


FIG. 147. – Simulations de type A (bloc aléatoire) réalisées dans un bloc cubique de 50 m d'arête, traversé verticalement en son centre par le puits EPS1 entre –1850 et –1900 m. Coupe verticale W-E passant par le puits. La totalité des 146 fractures imposées relevées sur carottes sont figurées dans chaque simulation. A : 30000 fractures. B : 105000 fractures. Autour de l'axe du puits, la contrainte de position provoque l'apparition préférentielle d'amas de fractures.

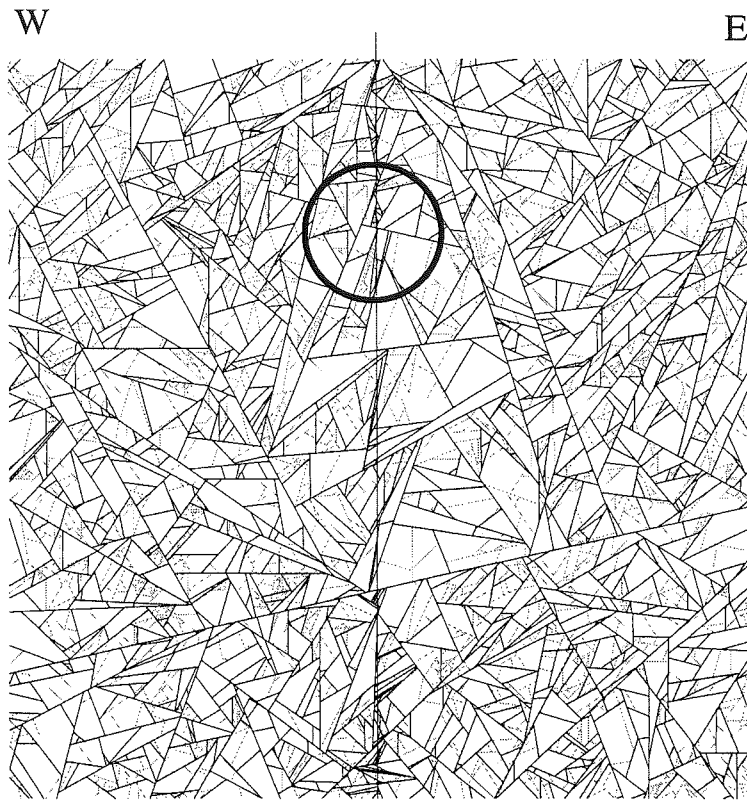


FIG. 148.— Schéma de principe résultant de la mise en œuvre des processus B (germe aléatoire dans le modèle, en trait sombre, 20000 fractures, dont 110 fractures du puits), puis du processus A (bloc aléatoire, en trait clair, 130000 fractures supplémentaires, dont les 36 fractures du puits restantes). Le cercle indique la position de la figure 149. Dans cette simulation, en raison de la répartition des fractures du puits sur un nombre réduit de blocs, la trace du puits est encore visible.

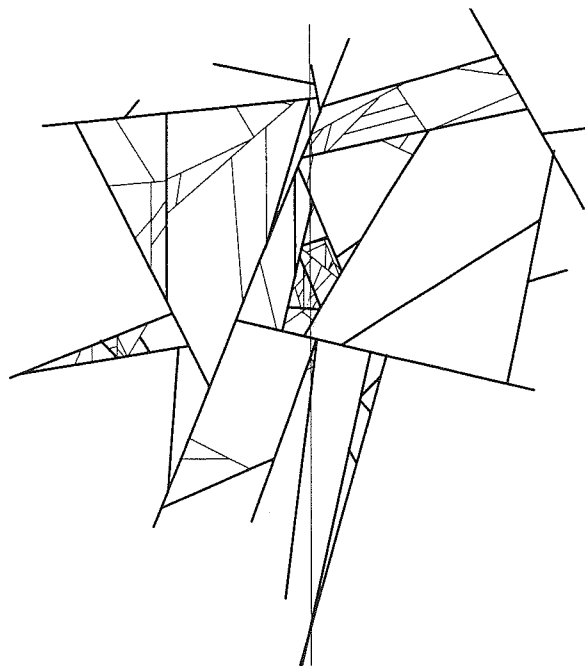


FIG. 149.— Détail de la figure 148 montrant les deux phases de réalisation de fractures : fractures de type B (trait sombre), puis fractures de type A (trait clair). Les deux types de fractures recoupent éventuellement le puits.

Le tableau en bas de la page présente les résultats ainsi obtenus, sur un modèle parallélépipédique de différents volumes, traversé axialement par le puits, pour la même zone de profondeurs -1850-1900 m. Comme il a été dit plus haut (fig. 138), on peut raisonnablement considérer la densité linéaire comme constante dans cette zone :

$$d = N_L / L \approx 2,9.$$

Arête (Ox = Oy)	Volume V	N_L	N_L / V
5 m	1250 m ³	4500 ± 500	3,6 ± 0,4
10 m	5000 m ³	14570 ± 1000	2,9 ± 0,2
50 m	125000 m ³	350000 ± 20000	2,8 ± 0,2

N_L : Nombre de fractures périphériques générées.

Les valeurs de l'incertitude ont été fournies par 3 simulations différentes dans chaque cas. Cette incertitude est importante, et elle augmente encore lorsque l'arête Ox = Oy diminue, le contraste de la zone du puits devenant moins facilement visible (fig. 151). La proportionnalité de N_L au volume est très approximative, mais on note que la densité linéaire dans le puits est du même ordre que la densité volumique des fractures dans le modèle :

$$d \approx N_L / V$$

L'homogénéité des notions de densité volumique et linéaire fait qu'on attendait plutôt une égalité entre ces deux valeurs, conformément à l'équation de dimension :

$$D_v = \frac{[S]}{[V]} = \frac{[L]^2}{[L]^3} = \frac{1}{[L]} \equiv D_L$$

Si l'on calcule les valeurs des densités volumiques correspondant aux simulations de la figure 151, on obtient les résultats ci-dessous (fig. 150).

Nombre de fractures	Surface des fractures (m ²)	Dv = S/V
3000	17867	14,3
3500	19022	15,2
4000	19164	15,3
5000	20290	16,2
7000	21714	17,4
10000	23100	18,5
20000	25925	20,7

Fig. 150.- Valeurs de la densité volumique des fractures pour les simulations de la figure 151.

Les valeurs à retenir pour la densité volumique sont celles obtenues pour un nombre de fractures entre 4000 et 5000 (encadré dans le tableau).

A plus grande échelle, ce type de processus permet également d'obtenir des coupes présentant une fracturation homogène (fig. 152). Sur les coupes situées à l'extérieur du modèle, on a observé un effet de bord (densité plus faible de fractures). Cependant, il apparaît que cet effet de bord a une portée limitée, et il n'est déjà plus visible au-delà de 5 mètres comme cela peut se voir dans le cas de la simulation de la figure 152.

4.2.6. Obtention d'un modèle valide

La génération des fractures dans notre modèle a été étudiée de façon à rendre optimale la compatibilité géométrique entre la zone du puits et la périphérie. Les étapes précédentes nous ont permis d'obtenir les trois conclusions suivantes :

Premièrement, le moteur ne fournit des images correctes du point de vue de la compatibilité géométrique, que lorsque les fractures imposées du puits sont intercalées (réparties) parmi les fractures périphériques ;

En second lieu, parmi les quatre processus étudiés, seuls les processus A et B permettent de générer des réseaux satisfaisants. Toutefois, ces deux processus utilisés isolément n'aboutissent pas à un résultat satisfaisant. On n'obtient des images correctes qu'en alternant ces processus A et B lors de la génération ;

Enfin, le nombre de fractures à générer dans un volume donné pour obtenir une densité volumique compatible avec la densité linéaire observée le long du puits a été évalué empiriquement. Ce nombre de fractures N_L répond très approximativement à la relation :

$$N_L \approx d / V,$$

où d est la densité linéaire des fractures dans le puits, et V le volume du modèle.

En appliquant les trois principes ci-dessus, nous avons pu réaliser une simulation dont une coupe Ouest-Est passant par le puits est donnée par la figure 153.

Les fractures générées sont du type B pour les 20000 premières, puis type A pour les 130000 fractures suivantes, puis type B pour les 30000 fractures suivantes, et enfin type A pour les 180000 dernières. Les 146 fractures imposées du puits sont réparties uniformément tout au long du processus.

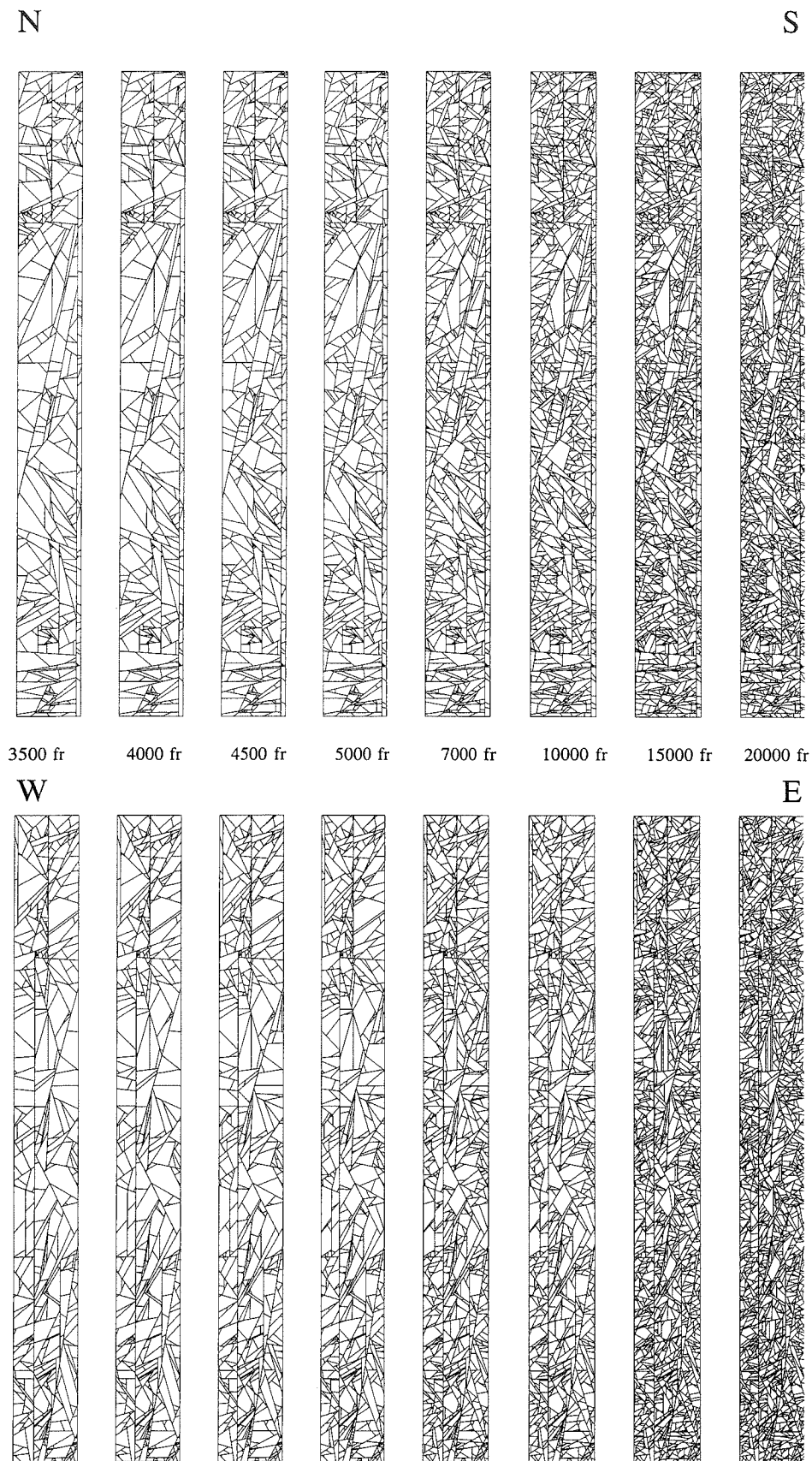


FIG. 151.— Simulation à petite échelle dans un modèle parallélépipédique de $L = 1 = 5\text{m}$, et $h = 50\text{m}$. Coupes verticales passant par le puits EPS1 (-1850-1900m), nord-nud en haut, et ouest-est en bas, pour des nombres de fractures variables indiqués. Les coupes comportant 4000 à 5000 fractures montrent une répartition homogène.

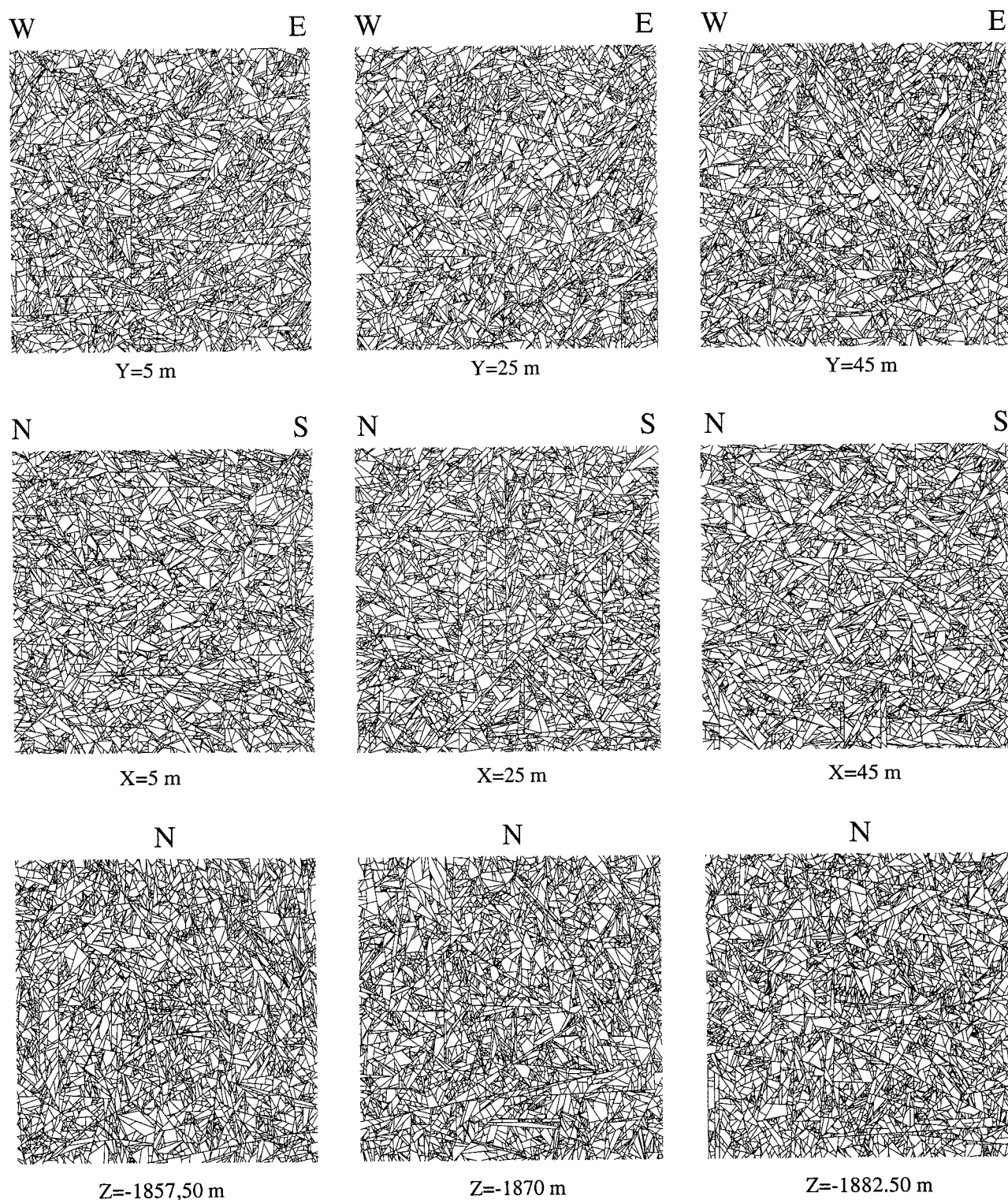


FIG. 152.— Simulation de 360 000 fractures dans un volume cubique de 50x50x50 m traversé axialement par le puits EPS1, entre -1850 m et -1900 m. En haut, coupes verticales ouest-est en Y=5 m, Y=25 m (passant par le puits), Y=45 m. En bas, coupes verticales nord-sud en X=5 m, X=25 m (passant par le puits), X=45 m. Les coupes ont une apparence homogène.

Cette alternance dans les processus de découpage A et B, et les proportions correspondantes ont été recherchées par tâtonnement, avec comme but la minimisation de l'effet de couloir. L'effet de couloir apparaît ainsi minimal, voire absent. On obtient en quelque sorte, avec une vraisemblance raisonnable une extrapolation 3D d'un profil 1D observé, dont nous donnons ici la représentation 2D.

La figure 154 montre l'emplacement du puits central et des 4 puits fictifs réalisés dans le modèle et les projections hémisphériques des pôles des plans de fractures recoupés. On constate une similarité des orientations entre les puits périphériques, et le puits central EPS1. Les distributions peuvent être considérées comme équivalentes.

4.2.7. Distances interfractionnelles

Les distances interfractionnelles pour 25 puits fictifs ont été reportées sur la figure 155. En représentant en

coordonnées semi-logarithmiques le nombre $N_{>i}$ d'intervalles supérieur à i , en fonction de i , on constate que les courbes $\text{Log}(N_{>i}) = f(i)$ obtenues sont des segments de droite de pente A et d'ordonnée à l'origine B, avec :

$$A = -1,00 \pm 0,12$$

$$B = 2,06 \pm 0,05$$

Ces valeurs sont très semblables à celles obtenues sur le puits central ($A=1,06$, $B=2,08$). Par ailleurs, la pente A est quasiment unitaire, ce qui indique une dimension fractale de $D=1$ pour les profils obtenus. Les points intersections tendent donc à couvrir entièrement le segment.

Le but que nous nous étions fixé de représenter l'exhaustivité des fractures observées dans une portion de puits a été atteint. Une bonne coïncidence géométrique a été obtenue entre zones « déterministe » et zone « stochastique » (cf fig. 141). Les paramètres de distribution des intervalles de fractures ne varient pas significativement dans le modèle.

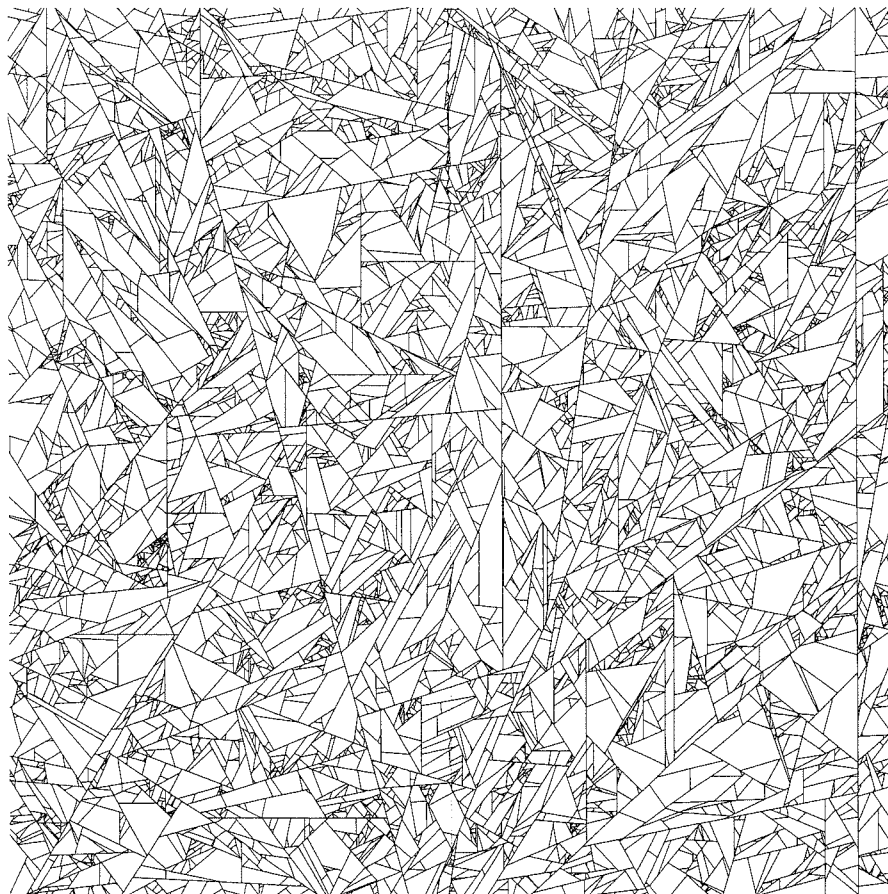


Fig. 153.- Simulation comportant 360 000 fractures non recoupantes dans un volume de 50x50x50 mètres, autour du puits EPS1 pour des profondeurs entre -1850 et -1900 m. Coupe verticale W-E passant par le puits. Celui-ci est matérialisé par le segment vertical et montre la totalité des 146 fractures relevées visuellement sur carottes.

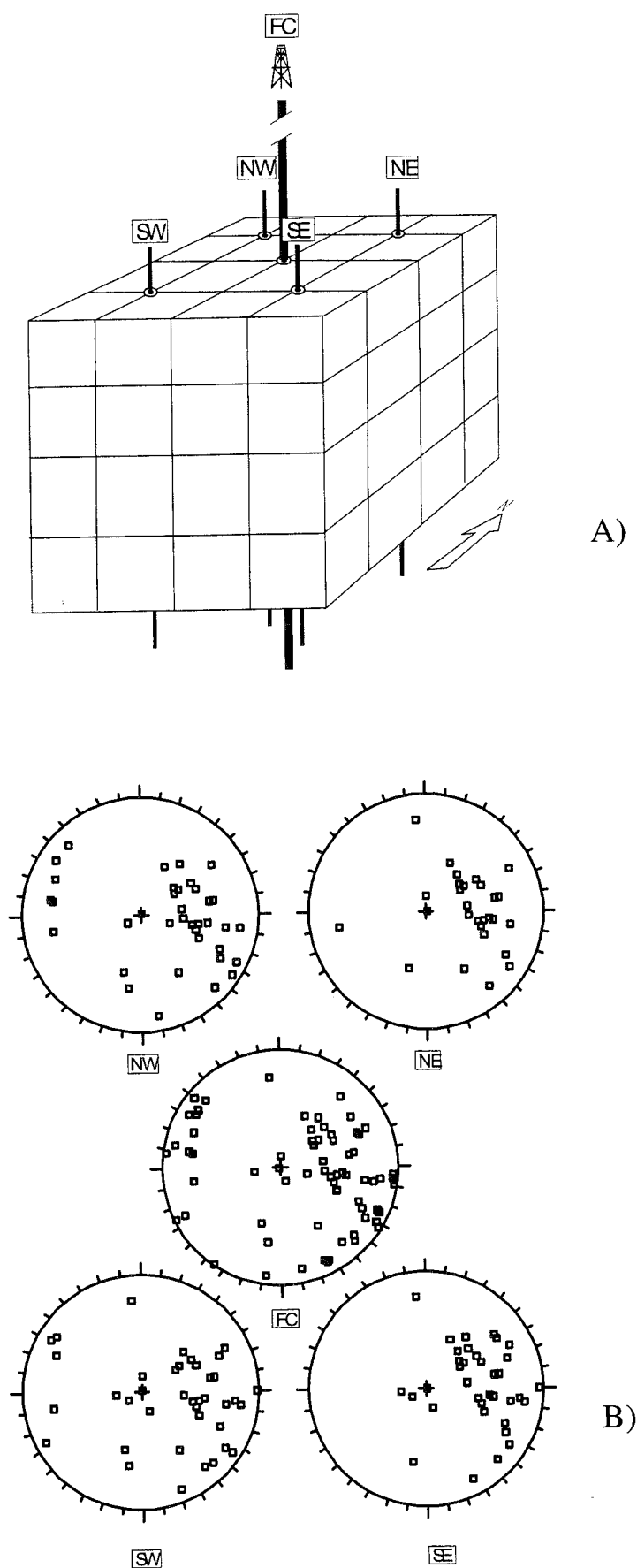


FIG. 154.- A) Emplacement des puits fictifs dans le modèle ; B) Diagrammes des pôles des plans de fractures recoupés par les puits fictifs.
FC : forage central (données observées) ; NW, NE, SW, SE : forages fictifs latéraux.

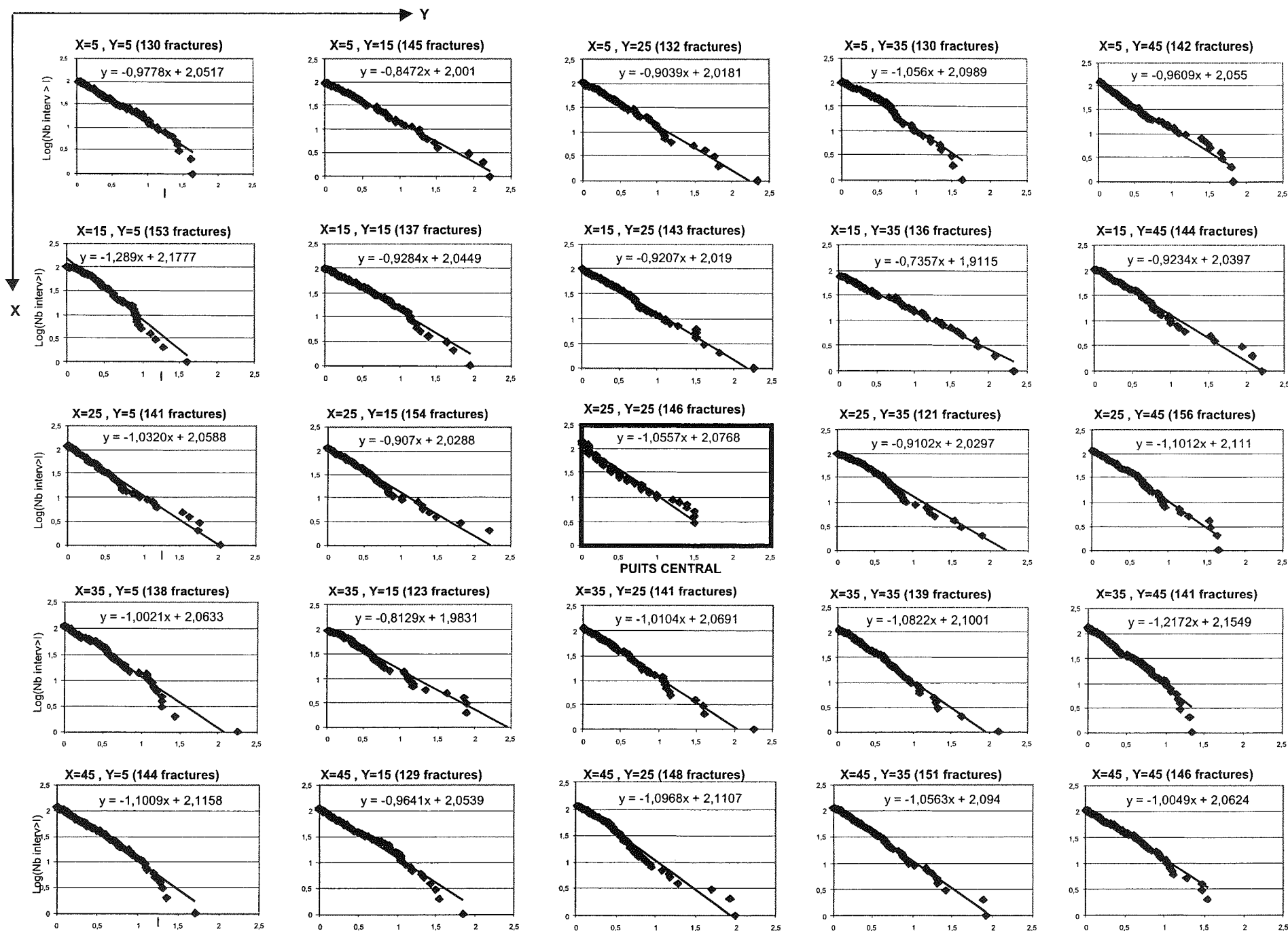


FIG. 155.— Diagrammes de distances interfractionnelles sur 25 profils verticaux, de coordonnées (X,Y) indiquées. Simulation de 321000 fractures, effectuée dans un volume cubique de 50 m d'arête, traversé axialement par le puits EPS1, pour des profondeurs Z entre -1850 et -1900 m. Les données du puits sont figurées dans le diagramme central (X=Y=25).

4.3. Réflexions sur le problème de la chronologie des fractures

Nous avons présenté ci-dessus un modèle mettant en jeu des fractures non recoupantes, et nous avons montré sa validité. Dans ce contexte, la surface des fractures produites décroît avec l'avancement du découpage, les blocs à diviser étant de plus en plus petits (cf Seconde Partie). Les fractures forcées, tirées aléatoirement, ont elles aussi une extension de plus en plus faible lorsque le découpage avance. Or, à l'évidence, les fractures imposées du puits ont des extensions variables, depuis le millimètre jusque, peut-être, le kilomètre, sans que l'on puisse nécessairement accéder à cette mesure. Il est donc intéressant, pour la vraisemblance du modèle, de rechercher un moyen de contrôler l'extension de chaque fracture générée dans le volume considéré. Le mécanisme de construction est séquentiel ; d'un point de vue pratique, nous utiliserons donc la chronologie de création des fractures pour rendre compte de leur extension.

Par ailleurs, contrôler l'extension des fractures permettrait d'améliorer la coïncidence géométrique entre fractures imposées et fractures périphériques. En effet, nous avons vu précédemment l'existence d'un phénomène de cloisonnement (effet couloir) entre ces deux populations de fractures. Nous avons limité cet effet en répartissant de façon régulière les fractures forcées parmi les fractures périphériques. Ce procédé est artificiel car la répartition dans le temps des fractures forcées parmi les autres fractures n'a sans doute rien d'uniforme. Il est donc utile de disposer d'un critère de répartition plus pertinent, pour contraindre la chronologie des fractures.

Nous proposons ci-dessous quelques pistes susceptibles de répondre à cet objectif, et qui pourraient faire l'objet d'un développement futur.

4.3.1. Ordre de génération et épaisseur des fractures

Lorsque les données sont disponibles, il est envisageable d'utiliser directement les valeurs d'épaisseur relevées pour les fractures pour conditionner l'extension de chaque fracture imposée du puits. Des auteurs allemands [Tenzer *et al.*, 1998] ont fourni quelques valeurs sur l'épaisseur des fractures, principalement sur l'échelle supra décimétrique. Ne disposant pas de données d'épaisseur précises sur l'intervalle -1850-1900 m pour le puits EPS1, nous illustrerons cette méthode de contrôle avec les relevés des 12 zones hydrothermalisées de ce même puits, pour des profondeurs de -1430 m à -2230 m (fig. 156).

On procède à un tirage des fractures pondéré par l'épaisseur.

Cinq simulations différentes ont été d'abord réalisées pour représenter les seules 12 zones hydrothermalisées et évaluer la variabilité des coupes obtenues (fig. 157).

On obtient ainsi dans un premier temps une représentation schématique générale des zones fracturées les plus importantes. On observe sur ces figures que plus les discontinuités sont épaisses, et plus elles apparaissent systématiquement prioritaires dans la génération. C'est le cas des zones 3 et 4 (fig. 157). Les zones fracturées d'épaisseur comparable montrent entre elles une très grande variabilité dans leur chronologie, comme on peut le voir pour les fractures de faible épaisseur 16a, 16b et 16c. Les variations de chronologie sont donc importantes pour une même classe d'épaisseur de fractures. Ces variations existent encore, dans une certaine mesure, pour des fractures d'épaisseurs différentes, par le jeu des probabilités. Ainsi les fractures 18c et 20, de classe [2 m, 5 m] précèdent parfois les fractures 18a ou 18b de classe [5 m, 10 m], comme dans le cas de figures S1, S3 ou S5 (fig. 157).

Zone	Profondeur moyenne	Epaisseur (m)	Direction de plongement	Pendage
1a	-1432,1	3,0	236	68
1b	-1458,1	4,6	48	72
1c	-1514,3	5,6	28	76
3	-1643,2	23,9	76	58
4	-1674,6	9,4	56	44
16a	-2061,4	0,6	248	61
16b	-2074,0	0,3	295	18
16c	-2079,3	1,3	263	38
18a	-2160,8	9,1	250	34
18b	-2170,9	9,2	326	23
18c	-2178,8	4,2	278	53
20	-2224,0	4,1	300	70

FIG. 156. – Zones hydrothermalisées du puits EPS1 (d'après Genter [1995]).

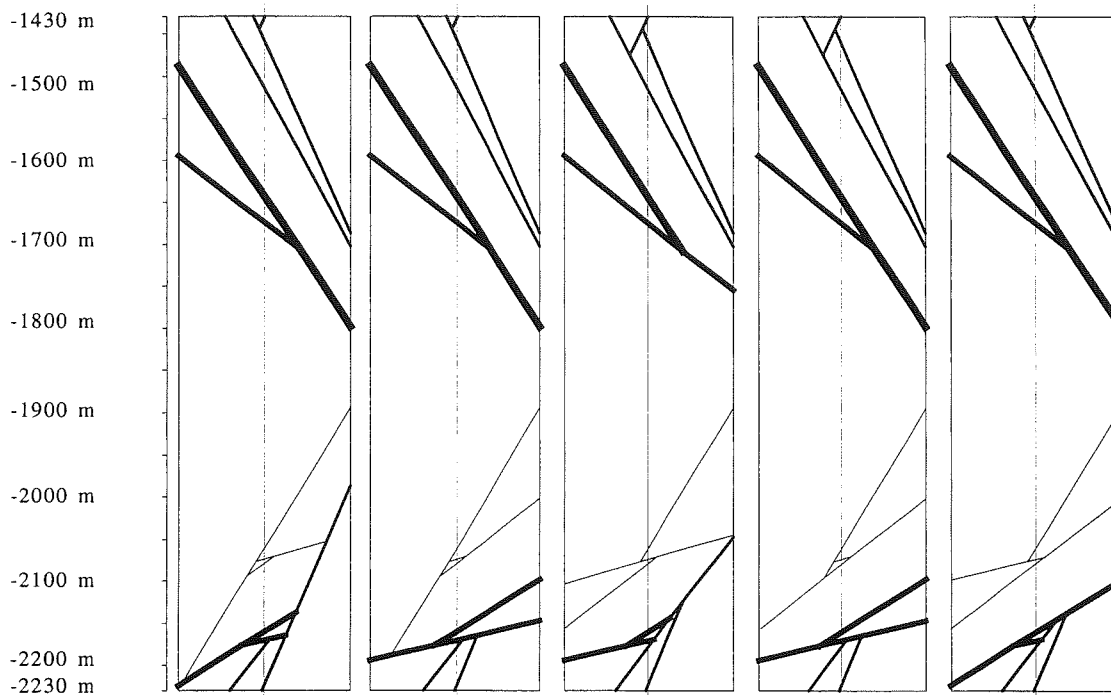


FIG. 157. – Représentation des 12 zones hydrothermalisées du puits EPS1 entre -1430 et -2230 m de profondeur (d'après Genter [1995], figure 156). Pour 5 simulations différentes S1 à S5 réalisées dans un volume de 200 m (X) x 200 m (Y) x 800 m (Z) autour du puits EPS1, on présente la coupe verticale W-E contenant l'axe du puits. L'ordre de tirage des fractures est pondéré par leur épaisseur. L'épaisseur de chaque fracture est représentée par l'épaisseur du trait, en quatre classes : $[0, 2 \text{ m}[$, $[2, 5 \text{ m}[$, $[5, 10 \text{ m}[$, $[10 \text{ m}, +\infty[$. Les zones fracturées les plus épaisses sont les plus stables statistiquement.

On peut ensuite enrichir ce modèle par les 2944 fractures d'épaisseur infra-décimétriques relevées sur les carottes. En l'absence de mesures précises, l'épaisseur de ces dernières a été arbitrairement fixée à 3 mm. On dispose ainsi d'une échelle d'épaisseurs allant de 3 mm à 24 m. Le tirage de chaque fracture forcée est toujours pondéré par l'épaisseur. Ainsi, on réalise prioritairement dans cette simulation les fractures les plus épaisses. Le résultat de cette simulation est présenté dans la figure 158.

On y retrouve les zones fracturées majeures de la figure 157. Les zones de densité maximale de fractures (relevée sur carottes) ont été représentées en grisé sur la figure. On note une certaine correspondance entre les zones fracturées majeures et ces zones denses. Dans la portion centrale, dépourvue de zone hydrothermalisée (-1700 m – 2050 m), les plus longues traces sont celles de plans tirés aléatoirement parmi les fractures d'épaisseur 3 mm et il n'y a donc pas dans cette zone de contrôle par l'épaisseur des fractures.

Cet exposé ne représente que les principes de l'ajout d'une contrainte sur l'ordre de génération, qui permet un contrôle sur l'extension des fractures. Un tel modèle pourrait être complété par des fractures "périphériques", relatives au contexte de fracturation, comme cela a été exposé précédemment sur l'intervalle entre -1850 m et -1900 m.

Cependant, la mesure directe de l'épaisseur des fractures ou des zones fracturées n'est pas toujours accessible, ce qui rend cette méthode délicate.

Nous donnons maintenant un second exemple de ce qui peut être fait pour contrôler l'ordre de génération des fractures, et donc leur extension.

4.3.2. Ordre de génération et densité des amas

Les lois d'invariance d'échelle et l'observation de terrain nous enseignent que souvent, ces zones fracturées présentent une densité de fracturation proportionnelle à leur épaisseur, l'épaisseur étant elle-même souvent corrélée à l'extension.

Notre seconde méthode se base sur ce constat, et prend comme principes que

- chaque amas observé sur carottes témoigne d'une zone fracturée,
- et que
- il existe une corrélation positive entre la densité de fractures dans un amas et l'épaisseur, donc l'extension de la zone fracturée correspondante.

La finesse du relevé sur carottes permet un inventaire précis à l'intérieur des zones fracturées, et donc une bonne mesure de la densité.

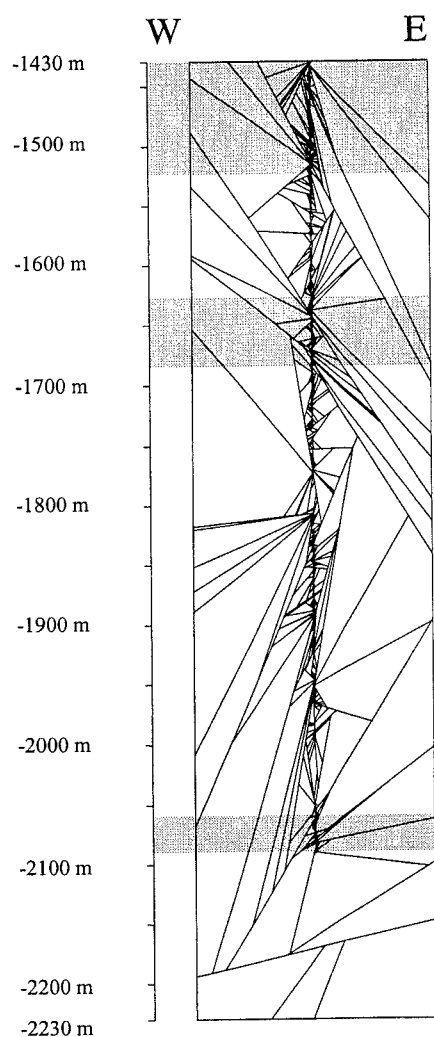


FIG. 158.— Simulation réalisée dans un volume de 200 m (X) x 200 m (Y) x 800 m (Z) autour du puits EPS1 (profondeurs Z comprises entre -1430 m et -2230 m), prenant en compte les seules fractures du puits (aucune fracture périphérique). Le tirage des fractures est pondéré par l'épaisseur. L'épaisseur des 12 zones hydrothermalisées (30 cm à 24 m) est donnée par la figure 156. L'épaisseur des 2944 autres fractures relevées sur carottes dans le puits, entre -1430 m et -2091 m a été fixée arbitrairement à 3 mm. Les trois zones grisées correspondent aux zones où la densité est maximale sur l'intervalle carotté (fig. 132).

D'un point de vue pratique, on numérote les N_{\max} fractures par profondeur croissante et on tire aléatoirement un numéro de fracture (ou nombre de fractures cumulé) dans l'intervalle $[0, N_{\max}]$ (voir figure 132). Cet algorithme permet de générer en priorité les fractures imposées correspondant aux zones fracturées, et donc, de leur donner une extension maximale.

Un exemple de résultat obtenu dans une telle simulation est présenté dans la figure 159.

La comparaison des figures 158 et 159 révèle que dans les deux cas précédents les fractures découpant

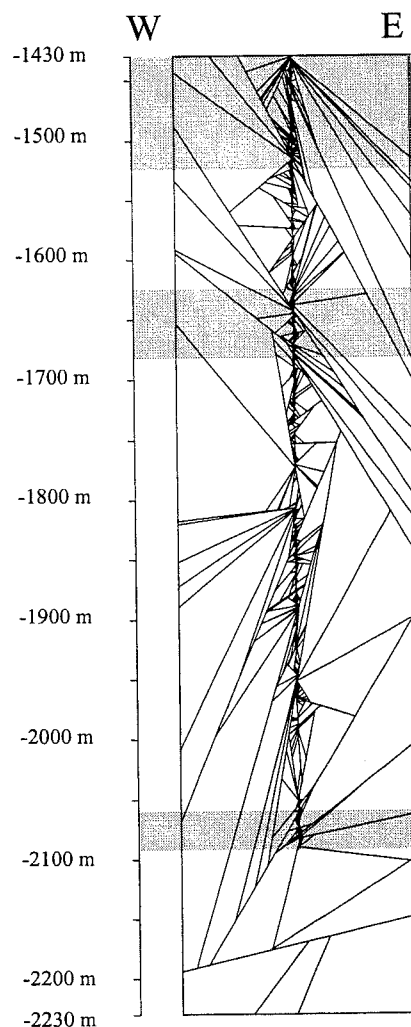


FIG. 159.— Simulation réalisée dans un volume de 200 m (X) x 200 m (Y) x 800 m (Z) autour du puits EPS1 (profondeurs Z comprises entre -1430 m et -2230 m), prenant en compte les seules fractures du puits (aucune fracture périphérique). Le tirage des fractures est pondéré par la densité linéaire des amas de fractures relevés sur carottes. L'épaisseur des 12 zones hydrothermalisées (30 cm à 24 m) est donnée par la figure 156. L'épaisseur des 2944 autres fractures relevées sur carottes dans le puits entre -1430 m et -2091 m a été fixée arbitrairement à 3 mm. Les trois zones grisées correspondent aux zones où la densité est maximale sur l'intervalle carotté (fig. 132).

toute la largeur du volume sont situées majoritairement dans les zones grisées, qui correspondent aux 3 zones fracturées principales de la figure 132.

Parallèlement, l'examen du tableau de la figure 156 situe les zones fracturées de Genter [1995] dans les intervalles de plus forte densité.

On obtient donc une bonne cohérence de ces différents résultats. L'utilisation de la corrélation densité des amas – extension des fractures peut éventuellement pallier l'absence de mesures concernant l'épaisseur des fractures.

4.3.3. Utilisation des fractures recoupantes

Nous avons examiné jusqu'ici des solutions pour contrôler l'extension des fractures dans le cas où ces fractures divisent des blocs élémentaires, autrement dit dans le cas de fractures non recoupantes. Un autre moyen de contraindre l'extension des fractures est d'autoriser un certain nombre de joints à recouper des discontinuités existantes.

On peut concevoir qu'un joint d'épaisseur minimale n'affecte qu'un seul bloc, tandis qu'une fracture épaisse recoupe plusieurs blocs. Ce postulat est d'ailleurs souvent corroboré par l'observation de terrain.

D'un point de vue mécanique, on peut justifier cette observation : l'énergie nécessaire au franchissement d'une fracture préexistante est largement supérieure à l'énergie nécessaire à la propagation de cette fracture au sein de la roche. Or, une fracture plus épaisse témoigne d'une plus grande quantité d'énergie en jeu ; une telle fracture est donc plus encline à franchir des discontinuités existantes.

On introduit ainsi dans le modèle une corrélation entre l'épaisseur des fractures et leur caractère plus ou moins franchissant. Une loi arbitraire a été choisie pour traiter cet exemple. Elle est donnée par le tableau ci-dessus (fig. 160).

Epaisseur E	Nb de blocs coupés
$E \geq 24 \text{ m}$	50
$9 \text{ m} \leq E < 24 \text{ m}$	10
$5 \text{ m} \leq E < 9 \text{ m}$	5
$4 \text{ m} \leq E < 5 \text{ m}$	4
$3 \text{ m} \leq E < 4 \text{ m}$	3
$1 \text{ m} \leq E < 3 \text{ m}$	2
$E < 1 \text{ m}$	1

FIG. 160. – Nombre de blocs recoupés par les fractures d'épaisseur E, dans la simulation de la figure 161.

On constate dans cette méthode également l'apparition de traces longues traversant le volume, et coupant le puits dans les 3 zones de plus forte densité, ce qui semble attester de la viabilité du procédé.

Cependant, pour aller plus loin, un étalonnage de la relation épaisseur – nombre de blocs traversés, fondé sur l'observation de surfaces 2D serait indispensable. Malheureusement, la rareté, voire l'inexistence de coupes montrant une gamme de longueurs de traces suffisante pour cet étalonnage est, à elle seule, une difficulté de taille.

Il faut remarquer par ailleurs que l'on corrèle ainsi à l'épaisseur d'une fracture le nombre d'intersections qu'elle franchit et non plus sa surface. On fait donc intervenir la taille des blocs et leur forme, paramètres qu'il est très difficile de contrôler.

Une telle approche serait intéressante dans la mesure où, en aval, elle utiliserait le paramètre épaisseur d'un point de vue non uniquement descriptif (modélisation des écoulements par exemple, voir Première Partie). Il conviendrait alors de valider l'hypothèse concernant le caractère franchissant des fractures épaisses par des observations de terrain.

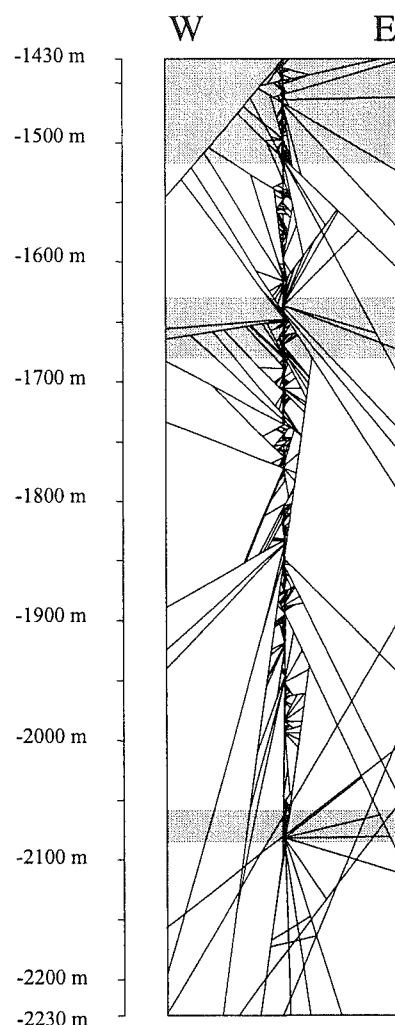


FIG. 161. – Simulation réalisée dans un volume de 200 m (X) x 200 m (Y) x 800 m (Z) autour du puits EPS1, pour des profondeurs Z comprises entre -1430 m et -2230 m, prenant en compte les seules fractures du puits (aucune fracture périphérique). Les fractures correspondant aux 12 zones fracturées de Genter [1995], (fig. 156) sont matérialisées dans le modèle par des plans recoupant d'autant plus de blocs que la fracture est épaisse (fig. 160). L'épaisseur des 2944 fractures relevées sur carottes dans le puits entre -1430 m et -2091 m a été fixée arbitrairement à 3 mm. Les trois zones grisées correspondent aux zones où la densité est maximale sur l'intervalle carotté (fig. 132).

4.3.4. Problème de la corrélation inter-puits dans le cas de Soultz

Nous poursuivons notre discussion sur l'étendue des fractures. Nous avons introduit une contrainte dans notre modèle en fixant la position et l'orientation d'un nombre fini de fractures le long d'un puits P1. Nous avons vu que, ces contraintes de position et d'orientation disparaissant brutalement lorsqu'on s'éloigne du puits, les configurations possibles du réseau dans une zone Z1 autour de ce puits sont en nombre infini.

Par ailleurs, on peut imaginer le cas où un second puits P2, situé suffisamment près de P1, fournit une séquence de données de position et d'inclinaison des plans de fractures (fig.162).

Le problème se pose alors de la coïncidence géométrique entre les plans de la zone Z1 et ceux relevés dans le puits P2. Nous trouverons dans ce système :

- des plans de fractures relevés dans P1 ne recoupant pas le puits P2,
- des plans relevés dans P2 ne recoupant pas le puits P1, ou encore
- des plans de fractures recoupant à la fois P1 et P2.

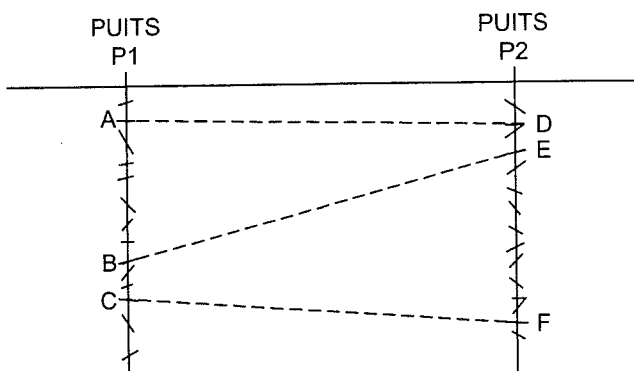


FIG. 162.- Illustration en 2 dimensions du problème de corrélation des fractures entre 2 puits. Les plans de fractures A, B, ou C relevés dans le puits P1 peuvent éventuellement être prolongés et correspondre aux fractures respectives D, E ou F observées dans le puits P2. L'hypothèse est raisonnable si les plans de fractures ont une extension infinie. Si les fractures ont une extension finie, la recherche de correspondance 2 à 2 des fractures est théoriquement impossible.

Ce problème intéressant du point de vue théorique est simple à traiter lorsqu'on considère que les fractures ont une extension infinie. On ne prend alors en compte que leur orientation, et on cherche à associer les fractures deux à deux d'un puits à l'autre, en pratiquant une interpolation (fig. 162).

Dans le cadre de notre modèle appliqué à Soultz, les fractures coupent un bloc élémentaire. Elles ont donc une extension finie, et le problème est plus complexe.

Nous avons choisi de ne pas le traiter ici, pour les raisons suivantes :

Si les fractures ont une extension finie, certaines fractures relevées dans un puits ne touchent pas l'autre puits, d'autres seront visibles dans les deux puits. Quelle contrainte poser alors pour identifier les bipoints correspondant à une même fracture dans les deux puits ?

Dans le cas présent de Soultz, les seules données disponibles pour compléter celles du puits EPS1 dans cette optique sont celles des puits GPK1 et GPK2, sondages réalisés tous deux en mode destructif. Ces données, issues d'outils différents ayant des résolutions différentes ne sont pas utilisables dans l'esprit d'une modélisation de la petite fracturation.

On peut envisager de construire une simulation autour des deux puits GPK1 et GPK2, tous deux forés en mode destructif. Dans ce cas, la méthode d'investigation est identique ou au moins comparable (BHTV). On se heurte cependant à la distance entre ces puits (450 mètres environ), qui conduirait à choisir un volume très important pour la simulation, dans lequel un nombre extrêmement important de fractures et d'autres éléments géométriques (blocs, faces, arêtes et nœuds) seraient modélisés.

L'orientation de la fracturation locale est majoritairement subméridienne dans le secteur de Soultz. D'autre part, les puits GPK1 et GPK2 sont placés selon un axe NNW-SSE. Il y aura donc vraisemblablement peu de fractures recoupées à la fois par les deux puits. Rechercher à corréler des fractures d'un forage à l'autre dans ce contexte n'apparaît donc pas justifié dans le cadre d'une modélisation théorique. Par ailleurs, du point de vue de l'ingénierie géothermique, il semble que la circulation des fluides s'effectue plutôt selon des zones fracturées métriques à décamétriques, qui sont en nombre limité. Des tentatives de corrélation de ces zones fracturées entre les puits GPK1 et GPK2 ont déjà été proposées (Genter [1998], fig. 135). Il est vraisemblable que la circulation s'effectue au sein des zones fracturées à travers un réseau de petites fractures, plus ou moins variables en orientation, et pour lesquelles le problème de la corrélation inter-puits n'a pas de sens. La mise en correspondance des fractures de la petite fracturation a donc peu d'intérêt dans le cadre d'une optimisation du rendement du doublet géothermique.

5.- CONCLUSION

Les données monodimensionnelles du puits de forage carotté EPS1 ont servi de base à une tentative d'extrapolation en 3D dans un volume limité autour de ce puits.

Notre modèle nous a permis de trouver un

agencement de fractures satisfaisant la loi locale de distribution des orientations, et respectant en même temps la position et l'orientation des fractures observées sur les carottes du puits.

La construction de ce réseau a été faite en recherchant une coïncidence géométrique entre deux zones : la zone à proximité immédiate du puits, où les fractures sont imposées, et le reste du volume, parcouru par des fractures périphériques. Un certain nombre de conditions suffisantes pour obtenir cette coïncidence géométrique ont été identifiées :

Du point de vue du mécanisme utilisé pour générer des fractures, nous avons vu que deux processus seulement sont utilisables (A et B). Le processus de création d'une fracture dont la position est aléatoire dans le volume du modèle (processus B) n'est pas utilisable seul si l'on veut par ailleurs rendre compte des fractures imposées sur le trajet du puits. Le processus de division d'un bloc tiré aléatoirement (processus A) ne convient pas non plus individuellement. Une solution à ce problème de coïncidence entre fractures imposées du puits et fractures stochastiques dans le reste du volume modélisé, a été obtenue en alternant les processus A et B, dans des proportions qui ont été déterminées empiriquement. Le réseau de fractures engendré de cette façon correspond donc à une configuration réaliste.

Il est intéressant de s'interroger sur la signification possible de cette alternance de processus dans la genèse réelle du réseau de fractures. Le découpage de type B s'est révélé nécessaire dans nos simulations pour constituer l'« armature » initiale du réseau. On peut imaginer qu'il relève d'un phénomène généralisé, lent, pour lequel le massif se comporte comme un milieu isotrope. Ce type de fracturation pourrait correspondre au refroidissement du granite de Soultz. Le découpage de type A qui suit, et qui s'exprime préférentiellement dans les zones « fragilisées » par une fragmentation importante, évoque davantage un phénomène de type catastrophique ou, au moins, rapide. On peut penser par exemple à la phase de relaxation permienne, importante dans la région. Ultérieurement, la succession de phases tectoniques et de périodes plus calmes serait représentée dans notre modèle par l'alternance de phases de fracturation de type A et de type B.

Du point de vue de la cinématique de la génération, nous avons montré qu'il est nécessaire d'« intercaler » les fractures imposées parmi les fractures périphériques au cours du processus de génération. Ceci revient à introduire une chronologie relative, d'une part entre fractures imposées et fractures périphériques, et d'autre part entre les fractures imposées du puits elles-mêmes. L'établissement de cette chronologie est délicate en présence des seules données monodimensionnelles.

Il est intéressant d'évaluer le nombre des entités descriptives (fracture, bloc, face, arête, nœud) dans la

base de données, ayant permis d'arriver à ce résultat.

Pour une densité de fracturation linéaire modérée dans le puits (146 fractures pour les 50 m linéaires considérés, cf figure 132), l'extrapolation dans un cube de 50 m d'arête produit dans la base de données les entités suivantes (fig. 163).

Fractures	Blocs	Faces	Arêtes	Nœuds
360 000	720 001, dont 360 001 blocs élémentaires	3 565 380	4 808 074	1 602 700

Fig. 163.— Nombre d'éléments produits dans la base de données pour une simulation autour du puits EPS1 (zone -1850-1900 m, cube de 50 m d'arête).

On constate que 360 001 blocs élémentaires sont nécessaires dans notre volume cubique de 50 m d'arête pour rendre compte en 3D de la fracturation linéaire visible dans le puits central.

Le nombre de faces indiqué ci-dessus concerne l'ensemble des faces des blocs, élémentaires ou composés d'autres blocs. Il en va de même des nombres d'arêtes ou de nœuds : ces valeurs n'ont d'intérêt qu'en termes de nombre d'entités stockées dans la base de données.

Les entités de « liaison » (se reporter à notre Seconde Partie), destinées à représenter la composition de chaque bloc en termes de faces (table FB), de chaque face en termes d'arêtes (table AF), de chaque face en termes de nœuds (table NF) sont très nombreux comme l'indique le tableau ci-dessous (fig. 164).

Table FB (1 Bloc-n Faces)	Table AF (1 Face-n Arêtes)	Table NF (1 Face-n Nœuds)
4 667 398	14 963 922	14 963 922

Fig. 164.— Nombre d'entités de liaison produits dans la base de données dans une simulation autour du puits EPS1 (zone -1850 à -1900 m, cube de 50 m d'arête).

Une telle simulation génère ainsi plus de 45 millions d'éléments descriptifs distincts, nécessitant une capacité de stockage informatique sur support magnétique d'environ 2,3 giga-octets. Le temps de traitement nécessaire à l'obtention de ces résultats dépasse la centaine d'heures sur un micro-ordinateur actuel (Pentium III).

Ce type de représentation dans un volume très important, ou avec une densité de fracturation plus forte sera rapidement handicapée par la lourdeur imposée par la gestion de ces éléments. Par ailleurs, l'enrichissement d'un tel modèle avec des données discrètes relatives aux propriétés thermiques, hydrauliques ou mécaniques est un travail considérable étant donné le nombre d'entités gérées.

TROISIEME PARTIE

CHAPITRE 2

ÉTUDE DE LA STABILITÉ D'UN SYSTÈME DE BLOCS

1.- PROBLÉMATIQUE : LA RUPTURE D'ÉQUILIBRE DANS LE PHÉNOMÈNE D'ÉBOULEMENT

Jusqu'à présent dans ce mémoire, nous avons envisagé un espace rocheux, de volume prédéterminé et nous avons considéré que cet espace peut être, dans certaines conditions, composé de la juxtaposition de blocs, de tailles et de formes diverses. Nous nous sommes intéressés jusque là à des volumes souterrains, dans lesquels les blocs ne sont pas directement visibles.

En surface, en revanche, la notion de bloc est familière aux géotechniciens ou aux ingénieurs de génie civil: le bloc est le volume élémentaire dans les phénomènes naturels où la rupture de la stabilité d'un escarpement est constatée. La recherche des causes de tels phénomènes demande une analyse de terrain. Dans le cas d'un éboulement, l'expérience montre alors souvent que ce n'est pas la résistance propre de la roche qui est à l'origine de la perte de stabilité, mais plutôt la disposition et le degré de continuité des fractures. Ainsi, le découpage plus ou moins accusé de la zone rocheuse en blocs conditionne dans certains cas l'aléa d'éboulement [Goguel, 1980]. Ainsi, les discontinuités de grande extension (failles majeures) ont été rendues responsables de plusieurs éboulements majeurs (voir par exemple Sartori *et al.* [1991]).

Du fait de l'érosion, ou de mouvements tectoniques par exemple, on obtient l'affleurement d'un puzzle tridimensionnel de blocs indépendants, de formes et de volumes variables, délimités par des discontinuités de largeur et d'extension variables.

A ce stade limite, l'étude de prévision de l'aléa d'éboulement porte alors en particulier sur la stabilité de l'édifice de blocs. D'un point de vue pratique, on cherchera sur le terrain à identifier les blocs qui, par leur forme, leur position sont les plus instables, donc les plus prédisposés à sortir du système de blocs, et donc à initier l'éboulement. Après leur départ, la configuration du « puzzle » se trouve modifiée ; d'autres blocs peuvent être en position instable, et partir à leur tour, en prolongeant le phénomène.

Une étude uniquement théorique dans ce domaine ne peut évidemment pas prétendre apporter des solutions exhaustives à des questions de cet ordre, qui demandent l'intégration de nombreux facteurs, intrinsèques ou

externes au site. Cependant, dans le cas particulier de notre mosaïque de blocs, il nous a paru intéressant de tenter de caractériser la rupture d'équilibre d'un point de vue géométrique, pour des configurations différentes du système de blocs.

C'est à cette question que nous nous adresserons dans ce chapitre, en proposant l'application de notre modèle à la rupture d'équilibre de type éboulement. Après une première partie consacrée au fondement théorique utilisé et à sa justification, nous verrons quels résultats peuvent être attendus de l'application de cette théorie à notre modèle.

2.- ÉTUDE DE LA STABILITÉ PAR LA THÉORIE DES BLOCS : FONDEMENT ET MISE EN OEUVRE

Avant d'exposer la méthode choisie, puis d'expliquer sa mise en œuvre dans notre modèle, nous formulerons ici les hypothèses préalables que nous avons retenues.

2.1. Les hypothèses de la théorie des blocs

Quelles sont les caractéristiques de l'assemblage naturel de blocs dont il est question ci-dessus ?

On peut, en première approximation, assimiler les joints limitant les blocs à des surfaces planes. Cette hypothèse classique, déjà formulée dans notre travail, a l'avantage de permettre une description de la morphologie des blocs par des équations linéaires.

Nous supposons que ces joints ne pénètrent pas au sein des blocs. Cela revient à considérer le bloc comme une entité de cohésion infinie. Dans le système, les seuls plans de fragilité sont donc les joints limitant les blocs. Ces plans sont déterminés et connus a priori.

Nous considérons un matériau rocheux solide, montrant une densité uniforme dans l'ensemble du modèle. Ce matériau rocheux est découpé, par des fractures d'épaisseur infinitésimale, en un assemblage de blocs rigides et indéformables. On exclut ainsi du champ de l'étude les phénomènes dans lesquels il y a déformation différentielle de la structure, et pour lesquels les caractéristiques intrinsèques de la roche sont déterminantes.

Les mouvements de blocs envisagés sont uniquement régis par la gravité et la friction sèche entre les blocs contigus. Cette hypothèse exclut donc la participation d'un fluide.

2.2. Les fondements de la Théorie des Blocs [Goodman & Shi, 1985]

Nous considérons l'assemblage de blocs tel qu'il a été défini plus haut, et nous nous intéressons plus particulièrement à la partie de cet assemblage exposée à l'air libre, telle qu'elle peut être visible dans un escarpement ou une excavation souterraine.

La Théorie des Blocs se donne pour objectif de trouver dans ce contexte les blocs critiques, c'est-à-dire ceux dont la présence est indispensable à la stabilité de l'édifice. On conçoit en effet que certains éléments peuvent être immédiatement libérés, sous le seul effet de leur poids, et que d'autres possèdent une taille, une forme, une position dans l'assemblage qui les empêche de bouger. De plus, le mouvement d'un bloc peut être rendu impossible par la présence de blocs voisins.

On peut ainsi établir une typologie des blocs dans l'édifice, selon leur propension à pouvoir être dégagés du système.

2.2.1. Classification des blocs en fonction de leur stabilité

La Théorie des Blocs distingue les blocs dits finis des blocs dits infinis. Ces derniers sont ceux dont les limites et le volume sont indéterminés a priori parce que l'affleurement ne permet pas de statuer (fig. 165).

Les blocs « infinis » ne peuvent pas être dégagés de l'assemblage 3D : ils sont « enracinés » dans le massif. C'est par exemple le cas du bloc B1 de la figure 165a.

Alors que les blocs « infinis » ne sont pas « dégageables », les blocs finis peuvent l'être, ou non, selon le cas. Les blocs B2 (fig. 165b) et B3 (fig. 166a) ne seront pas libérés tant qu'on n'agira pas sur leurs blocs voisins. En revanche, le bloc B4 (fig. 166b) peut être dégagé isolément.

Dans la suite du propos, on qualifiera de « non libres » les blocs qui, comme B2 (fig. 165b) ou B3 (fig. 166a), ne peuvent pas être dégagés sans bousculer la position ou l'orientation des blocs contigus.

A contrario, les blocs susceptibles d'être dégagés sans que l'on modifie ni la position ni l'orientation des blocs voisins, seront nommés blocs libres (fig. 166b).

Les blocs libres peuvent être plus ou moins stables. Ce degré de stabilité est décliné en 3 niveaux par Goodman et Shi [1985], soit, par ordre de stabilité décroissante :

1 - les blocs qui sont stables même si l'on considère nulles les forces de friction (fig. 167a). Un exemple en

est fourni par les blocs formant les voûtes en pierres sèches de l'architecture ancienne, dont la pièce sommitale assure la bonne tenue (« clé de voûte »).

2 - les blocs stables, mais pour lesquels l'annulation des forces de friction provoquerait la chute. Ces blocs sont qualifiés de blocs clés potentiels (fig. 167b).

3 - les blocs qui ne sont pas stables sauf s'ils sont supportés, que l'on nomme blocs clés (fig. 167c).

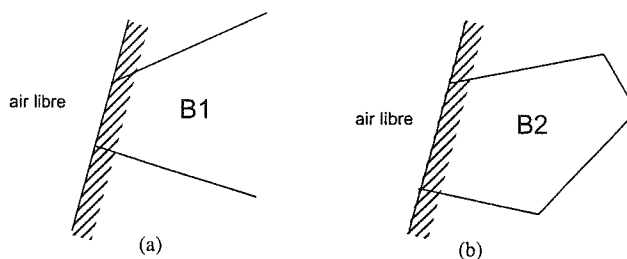


FIG. 165. – Deux exemples de blocs « infini » (B1) et fini (B2). La zone hachurée représente la paroi de l'escarpement rocheux.

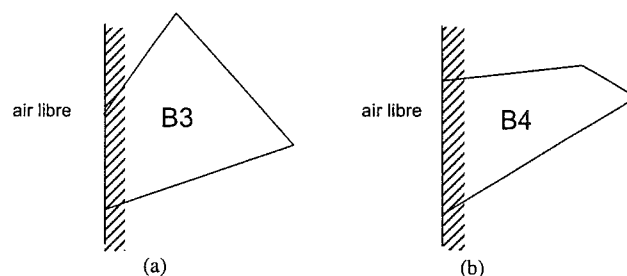


FIG. 166. – Deux exemples de blocs finis. a) : Le bloc B3 ne peut pas être dégagé : son déplacement est empêché par les blocs voisins. b) : Le bloc B4 peut être dégagé, soit avec l'aide d'une force extérieure, soit éventuellement sous son propre poids, selon les forces de friction.

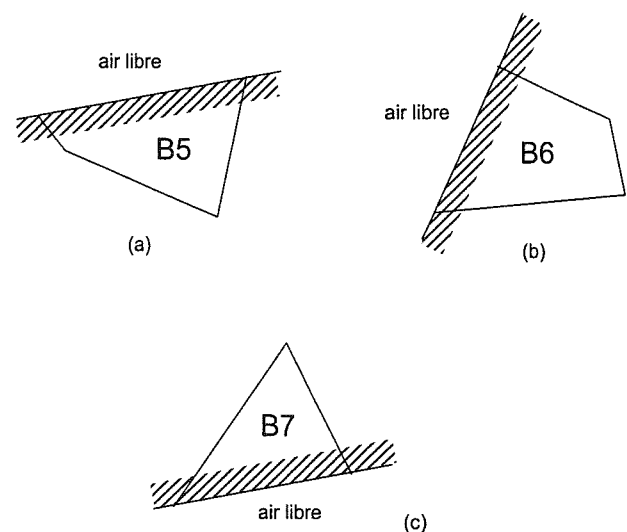


FIG. 167. – Les 3 catégories de blocs libres, c'est-à-dire qui peuvent être libérés sans déplacer préalablement les blocs voisins. a) : Bloc stable, quelles que soient les forces de friction ; b) : Bloc clé potentiel : bloc stable si les forces de friction sont suffisantes ; c) : Bloc clé réel : bloc instable s'il n'est pas maintenu en place. La différence entre (b) et (c) résulte de la valeur du rapport force de friction / force motrice.

On remarque que la distinction qui est faite par Goodman et Shi [1985] entre bloc clé et bloc clé potentiel est fonction de l'importance des forces de friction. Si ces forces sont suffisamment faibles, le bloc potentiel B6 (fig. 167b) devient bloc clé réel.

Le fait qu'un bloc soit libre ou non dépend, on le voit à travers ces exemples, de sa position et de sa géométrie. Afin de caractériser analytiquement ces différents types de blocs, nous devons recourir à une définition géométrique du bloc par le biais de demi-espaces. C'est cette description que nous exposons ci-dessous.

2.2.2. Demi-espaces et pyramides

Considérons l'espace muni d'un repère orthonormé $(\vec{0}, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$, tel que \vec{i} (1,0,0) soit orienté vers l'Est, \vec{j} (0,1,0) vers le Nord, et \vec{k} (0,0,1) vers le haut. Soit un plan P dans cet espace. Soit \vec{n}_P (a, b, c) le vecteur unitaire normal à ce plan P, orienté vers le haut (fig. 168).

On a, par définition $\vec{n}_P \cdot \vec{k} > 0$, ce qui s'écrit plus simplement :

$$c > 0 \quad (\text{III.2.1})$$

Le plan P a alors pour équation cartésienne :

$$P : ax + by + cz = d, \text{ avec } c > 0 \quad (\text{III.2.2})$$

Ce plan P partage l'espace en 2 demi-espaces. Le demi-espace positif (ou supérieur) est défini par l'ensemble noté S_P des points $M(X,Y,Z)$ tels que :

$$\vec{n}_P \cdot \vec{OM} \geq 0, \quad (\text{III.2.3})$$

ou encore, sous forme cartésienne,

$$aX + bY + cZ \geq d \quad (\text{III.2.4})$$

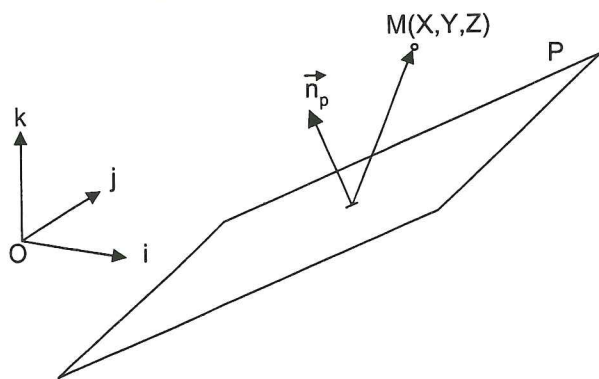


FIG. 168. – Définition du demi-espace supérieur d'un plan. Si P a pour équation cartésienne $ax + by + cz = d$, le demi-espace supérieur S_P de P est l'ensemble des points M tels que $\vec{n}_P \cdot \vec{OM} \geq 0$.

Inversement, le demi-espace négatif (ou inférieur) est l'ensemble noté I_P des points $M(X,Y,Z)$ tels que :

$$aX + bY + cZ \leq d \quad (\text{III.2.5})$$

Soit maintenant un système de n plans d'équations cartésiennes :

$$a_i x + b_i y + c_i z = d_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (\text{III.2.6})$$

Ces plans limitent n demi-espaces supérieurs, S_i , $i = 1, 2, \dots, n$, caractérisés par $a_i x + b_i y + c_i z \geq d_i$, et n demi-espaces inférieurs, I_i , $i = 1, 2, \dots, n$, caractérisés par $a_i x + b_i y + c_i z \leq d_i$.

Tout point $M(X,Y,Z)$ de l'espace peut être caractérisé par son appartenance à un nombre m de demi-espaces ($4 \leq m \leq n$). Ses coordonnées sont donc solutions d'un système de m inéquations.

L'intersection de ces m demi-espaces définit un ensemble de points qui peut être fini ou non (fig. 169).

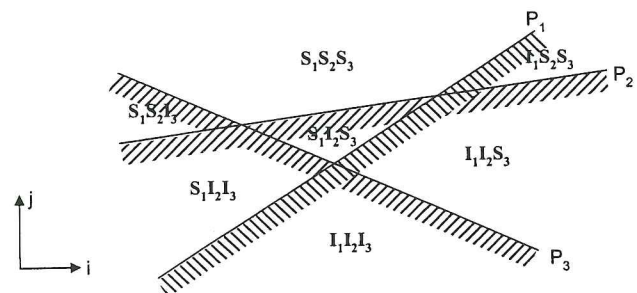


FIG. 169. – Représentation en 2D d'un système de plans limitant des demi-espaces. On caractérise les intersections de demi-espaces par des combinaisons de lettres dans lesquelles S_i désigne le demi-espace supérieur du plan P_i , et I_i son demi-espace inférieur. Les portions de l'espace obtenues peuvent être de volume fini ($S_1I_2S_3$ au centre) ou non (autres cas).

Goodman et Shi [1985] introduisent la notion de « pyramide », en translatant chaque plan pour qu'il passe par l'origine O. Pour un même bloc, sont ainsi définis plusieurs types de pyramides, dont nous retiendrons les deux qui nous sont utiles ici :

- La pyramide du bloc (*Bloc Pyramid*) est construite en considérant l'ensemble de tous les plans limitant le bloc, y compris les plans à l'air libre, en prenant pour chaque plan le demi-espace qui contient le bloc ;
- La pyramide des joints (*Joint Pyramid*) d'un bloc est constituée avec les plans limitant le bloc, à l'exclusion des plans à l'air libre. Comme pour la pyramide du bloc, on prend toujours, pour chaque plan, le demi-espace contenant le bloc.

2.2.3. Caractérisation des blocs finis

Le théorème de finitude [Goodman et Shi, 1985] donne une condition nécessaire et suffisante pour qu'un bloc convexe soit fini :

Théorème de finitude :

Un bloc convexe est fini si sa pyramide de bloc est vide ; il est infini si sa pyramide de bloc n'est pas vide.

La figure 170 illustre ce résultat en 2 dimensions.

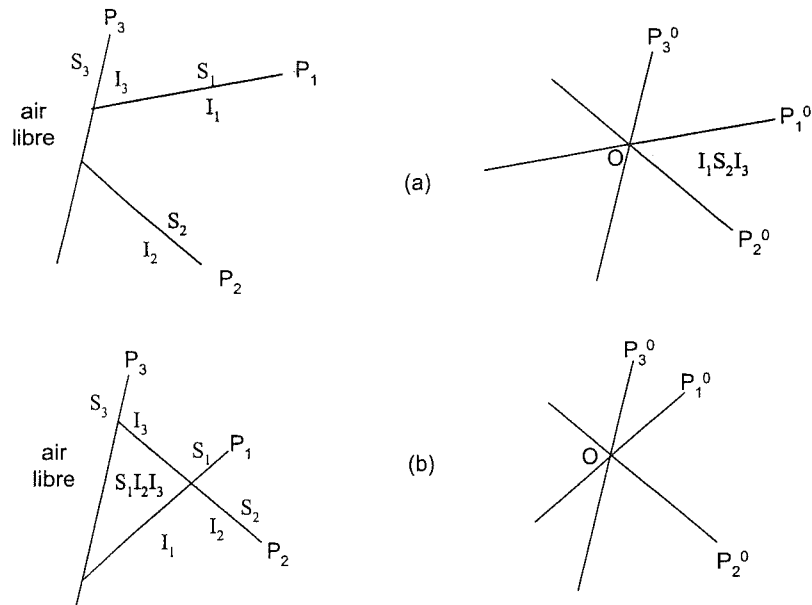


FIG. 170.— Illustration de la notion de pyramide de joint et de pyramide du bloc, et application du théorème de finitude. A gauche : les plans limitant les blocs ; à droite : les pyramides des blocs, obtenues par translation des plans jusqu'à l'origine. a) : La pyramide du bloc est constituée par l'intersection des demi-espaces $I_1S_2I_3$. Dans ce cas, elle n'est pas vide. D'après le théorème de finitude, ce bloc est infini. b) : Le bloc possède une pyramide de bloc vide, puisqu'il n'est pas possible de trouver un point M, différent de O, appartenant à l'intersection de demi-espaces $S_1I_2I_3$ lorsque les plans passent par l'origine. D'après le théorème de finitude, ce bloc est fini.

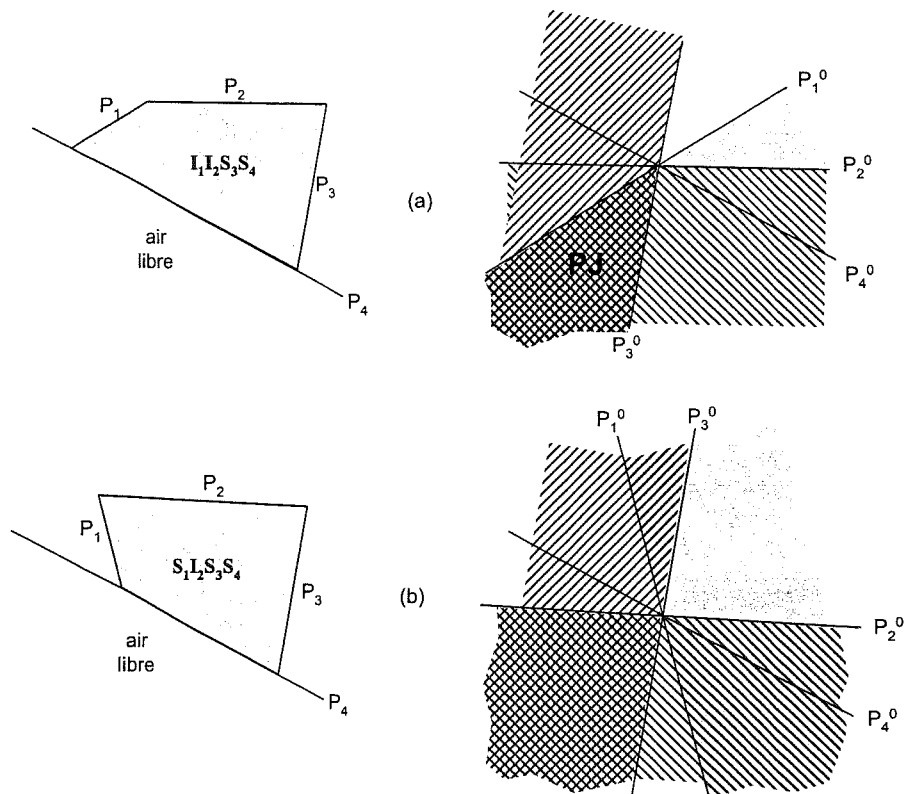


FIG. 171.— Illustration en 2D du théorème de Shi sur la « dégageabilité » du bloc. a) : Bloc libre ou dégageable. Le bloc est l'intersection des demi-espaces $I_1I_2S_3S_4$. Pour obtenir sa pyramide de joints (à droite) on considère les plans formant les joints du bloc, P_1^0, P_2^0, P_3^0 , qui sont la translation à l'origine des plans P_1, P_2 et P_3 . L'intersection des demi-espaces $I_1I_2S_3$ donne la pyramide des joints (PJ). Celle-ci est un ensemble non vide ; d'après le théorème de Shi, le bloc est libre. On remarque que la pyramide du bloc, obtenue par intersection de PJ et du demi-espace S_4 , est vide, indiquant que le bloc est fini. b) : Bloc non libre ou coincé. Le bloc est l'intersection des demi-espaces $S_1I_2S_3S_4$. De la même façon que pour (a), la pyramide des joints est formée par l'intersection des demi-espaces $S_1I_2S_3$ à partir des plans translattés. Dans ce cas, la pyramide des joints, comme la pyramide du bloc sont vides, confirmant qu'il s'agit d'un bloc fini, et non libre.

2.2.4. Caractérisation des blocs libres

Le théorème de Shi [Goodman et Shi, 1985] donne une condition nécessaire et suffisante pour qu'un bloc B dans un système de blocs donné, puisse être retiré sans action préalable sur les autres blocs.

Théorème de « dégageabilité » de Shi :

Un bloc fini convexe est « dégageable » si et seulement si sa pyramide des joints n'est pas vide. Inversement, un bloc fini convexe n'est pas dégageable si et seulement si sa pyramide des joints est vide.

Une autre formulation du théorème de Shi est qu'un bloc fini est non libre si et seulement si les demi-espaces des joints forment eux-mêmes un bloc fini.

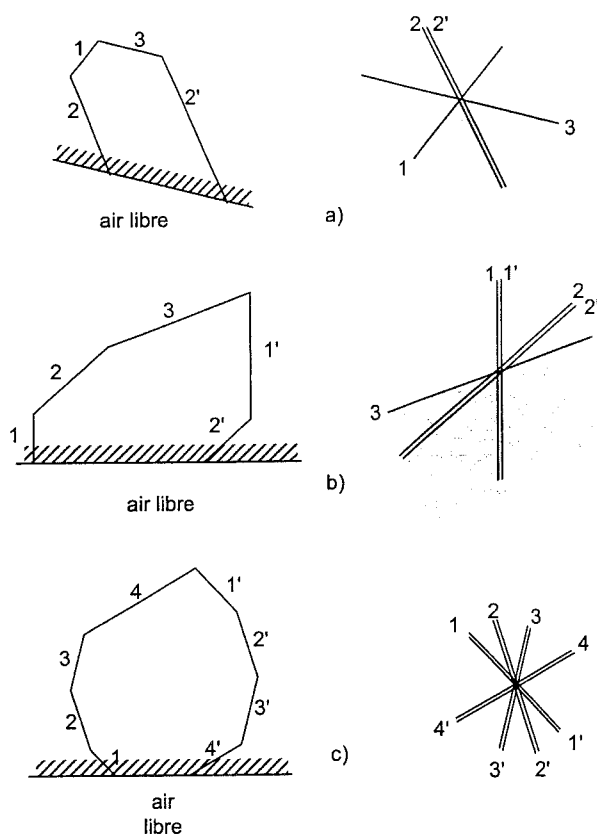


FIG. 172.— Exemples 2D de blocs dont la pyramide de joints présente une paire (a), deux paires (b) ou plus de deux paires (c) de faces parallèles. En a), le bloc présente deux faces parallèles (faces 2 et 2'). L'intersection des 2 demi-espaces tournés vers l'intérieur du bloc est la droite représentée à droite sous forme d'un trait double. L'intersection des 2 demi-espaces correspondant aux faces 1 et 3 est représentée en grisé. La pyramide des joints est donc une demi-droite ; le bloc est libre. En b), le bloc possède 2 paires de faces parallèles (1 et 1', 2 et 2'). Pour chaque paire de faces parallèles, l'intersection des deux demi-espaces est une droite. L'intersection des deux droites obtenues est « vide » au sens de Goodman et Shi, c'est-à-dire réduite au point origine O. Par conséquent la pyramide des joints est vide, et le bloc ne peut pas être dégagé. En c), le bloc présente 4 paires de faces parallèles, et on observe de la même façon une pyramide des joints vide.

Il faut noter qu'une pyramide comportera toujours le point O origine sur lequel on translate les plans des faces. Le vocable pyramide « vide » employé dans ce théorème définit donc en fait un ensemble réduit au point O. Une pyramide « non vide » est un ensemble de points non limité au point O. Ce théorème est illustré par la figure 171.

Le cas particulier des blocs ayant une ou plusieurs paires de faces parallèles est explicité sur la figure 172.

On peut montrer qu'en 2 dimensions, comme en trois dimensions, toute pyramide de joints montrant un nombre de faces parallèles supérieur ou égal à 2, est vide [Goodman et Shi, 1985] (fig. 172).

Nous disposons donc maintenant d'un critère pour tester la dégageabilité d'un bloc. Néanmoins, nous ne préjugeons pas à ce stade de la façon dont se fait la chute du bloc. La figure 167 montre trois cas correspondant à des blocs libres, qui auront pourtant vraisemblablement chacun un comportement différent. Dans le cas (a), le bloc devra être soulevé. Dans le cas (b), il est probable qu'il glissera sur sa face inférieure. Dans un autre cas, qu'il conviendrait de représenter en 3D, le bloc pourrait glisser sur un dièdre formé par deux de ses faces.

On conçoit donc que le mode de dégagement dépend des forces en présence, dont nous allons faire le bilan.

2.2.5. Les forces agissant sur un bloc libre

Considérons un bloc B rigide et indéformable, posé sur un plan incliné (fig. 173). Ce bloc clé (potentiel ou réel) tend à se déplacer dans le sens du vecteur unitaire \vec{s} , selon la ligne de plus grande pente. Le bloc est soumis aux forces suivantes :

- la force \vec{N} de réaction du support, normale au plan de glissement et dirigée vers le bloc ;
- la résultante \vec{T} des forces de frottement du bloc sur le plan ;
- la résultante \vec{R} de toutes les autres forces agissant sur le bloc. Dans le cas qui nous intéresse, il s'agira exclusivement du poids. \vec{R} aura donc systématiquement une direction verticale.

De façon à pouvoir évaluer la stabilité mécanique du bloc B, nous introduisons une force fictive \vec{F} , que nous définissons par $\vec{F} = -F \cdot \vec{s}$, et qui permet de maintenir le système à l'équilibre. Si le bloc tend à glisser, la force \vec{F} à appliquer pour rétablir l'équilibre a un module F positif. Au contraire, si le bloc est stable, la force \vec{F} aura un module négatif.

L'équation d'équilibre s'écrit alors :

$$\vec{N} + \vec{T} + \vec{R} + \vec{F} = \vec{0} \quad (\text{III.2.7})$$

En posant pour la force de frottement $\vec{T} = -T \cdot \vec{s}$, et en définissant $S = F + T$, on peut écrire :

$$\vec{T} + \vec{F} = -S \cdot \vec{s} \quad (\text{III.2.8})$$

On obtient la condition d'équilibre d'un bloc clé (potentiel ou réel) :

$$\vec{N} + \vec{R} = S \cdot \vec{s}, \quad \text{avec } S = F + T$$

(III.2.9)

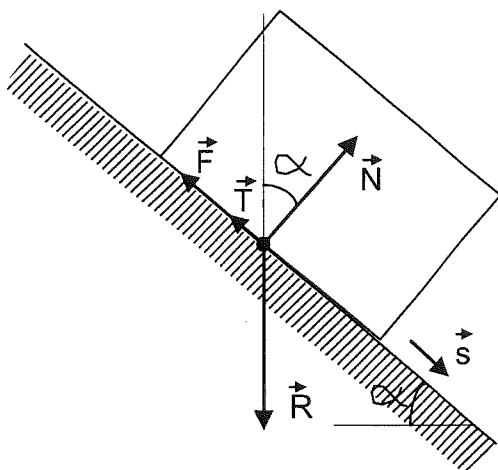


FIG. 173. – Les forces agissant sur un bloc à l'équilibre. \vec{N} est la réaction du support, \vec{T} la force de frottement, \vec{R} la résultante de toutes les autres forces actives, dont le poids, et \vec{F} est la force fictive assurant le maintien de l'équilibre.

D'après le théorème de Shi, la direction de glissement d'un bloc libre appartient à la pyramide de joints du bloc :

$$\vec{s} \in JP_B \quad (\text{III.2.10})$$

Nous allons affiner cette condition, de façon à déterminer quel mode de glissement s'applique à une pyramide de joint donné.

2.2.6. Les modes de dégagement d'un bloc libre

Nous enrichirons les hypothèses de base formulées plus haut (§ 2.1), en considérant les différents types de dégagement naturel d'un bloc libre. Géométriquement, la trajectoire du bloc lors de sa sortie de la pile sera décrite par une composante de translation, et/ou une composante de rotation. Le mouvement de translation pure correspondra à un glissement, celui de rotation pure par exemple à un basculement (fig. 174). Les mouvements de type mixte sont également possibles, sous des formes plus complexes, de vissages hélicoïdaux.

Le mécanisme de basculement est généralement rencontré dans des contextes topographiques surplombants [Hoek et Bray, 1981 ; Giani, 1993]. Il

s'accompagne souvent de phénomènes complexes tels que le tassement ou le flambage [Rouiller *et al.*, 1998]. Dans un but de simplification évident, nous négligerons, dans le cadre de ce travail, l'existence de trajectoires en rotation et nous tiendrons compte des seuls mouvements de translation. Cette négligence du facteur basculement est d'ailleurs courante dans les méthodes de détermination de l'aléa [Rouiller *et al.*, 1998].

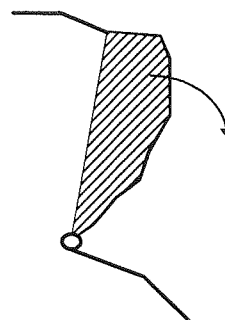


FIG. 174. – Mouvement de basculement naturel d'un bloc. Rotation autour du point O.

En premier lieu, la sortie du bloc peut s'effectuer par décollement, du plafond d'une excavation par exemple. Il n'y a alors aucune friction sur les faces des blocs, mais séparation simple de blocs jointifs.

Dans un autre cas, le bloc concerné peut glisser contre les blocs adjacents. Lors d'un tel glissement, un nombre variable de faces du bloc restent en contact avec les blocs voisins : une face dans le cas le plus simple, deux faces formant un dièdre dans d'autres cas.

Il est à prévoir qu'un bloc puisse également glisser sur plus de deux de ses faces, dans une « gouttière » formée par les blocs voisins (fig. 175). Ce cas nécessite au minimum deux arêtes parallèles. Il est donc improbable. En outre, les forces de friction et de réaction s'exercent à la fois sur toutes les faces du support, et le dégagement du bloc se fait de moins en moins facile, la probabilité de glissement diminue, lorsque le nombre de faces de la gouttière augmente. Il est donc légitime de nous limiter ici au glissement sur une ou deux faces, restriction que nous ajoutons désormais à nos hypothèses.

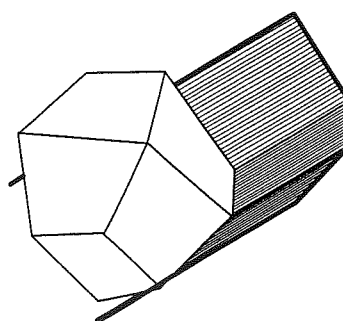


FIG. 175. – Exemple de glissement d'un bloc dans une gouttière formée par 3 faces.

Dans chacun des trois cas de figure possibles cités ci-dessus, nous nous intéresserons successivement au sens de mouvement du bloc (vecteur \vec{s}), puis à la condition de rupture d'équilibre, qui caractérise le mode de déplacement.

2.2.6.1. Décollement

Ce mode de dégagement est caractérisé par le fait que les joints de la pyramide des joints ne restent pas en contact. Pour cette raison, la réaction \vec{N} est nulle. La condition d'équilibre (III.2.9) s'écrit donc :

$$\vec{R} = S \cdot \vec{s}, \text{ avec } S \geq 0 \quad (\text{III.2.11})$$

soit, en considérant les vecteurs unitaires,

$$\vec{s} = \vec{r} \quad (\text{III.2.12})$$

D'après (III.2.10), \vec{s} est dans la pyramide des joints. Puisque les joints ne restent pas en contact, \vec{s} n'est pas sur les frontières de cette pyramide des joints. Pour exprimer ce résultat mathématiquement, considérons les normales unitaires à chacune des faces F_i de la pyramide des joints, \vec{n}_i , $i=1, \dots, n$, orientées vers l'intérieur du bloc. Le vecteur déplacement unitaire \vec{s} satisfait :

$$\forall i, \vec{s} \cdot \vec{n}_i > 0 \quad (\text{III.2.13})$$

Cette condition, illustrée par la figure 176, nous permet de caractériser les pyramides de joints correspondant à des blocs susceptibles d'être déplacés (ou de se déplacer) par décollement.

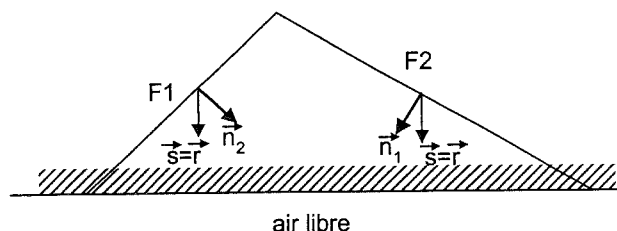


FIG. 176. – Dégagement d'un bloc libre par décollement. La pyramide des joints est constituée à partir des 2 faces F1 et F2. Le déplacement se fera selon le vecteur \vec{s} tel que $\vec{s} \cdot \vec{n}_1 > 0$ et $\vec{s} \cdot \vec{n}_2 > 0$.

Il est communément constaté dans la littérature [Rouiller *et al.*, 1998 ; Jaboyedoff, 1996 ; Hoeck *et al.*, 1981] que le décollement est rarement à l'origine du déclenchement même du processus d'éboulement. Ce mécanisme est plutôt considéré comme un facteur favorisant le glissement, une fois le phénomène déclenché, et participant à l'augmentation des volumes libérés.

2.2.6.2. Glissement sur une face

Dans ce cas, le déplacement est parallèle à une seule face de B, située dans le plan P_j . Le vecteur unitaire \vec{s} est de même direction que la projection orthogonale de

\vec{R} sur le plan P_j . Considérons \vec{r} , le vecteur unitaire de sens et direction \vec{R} , et soit \vec{n}_j le vecteur unitaire normal au plan P_j et orienté vers l'intérieur du bloc. \vec{s} est alors donné par (fig. 177) :

$$\vec{s} = \frac{(\vec{n}_j \wedge \vec{R}) \wedge \vec{n}_j}{|\vec{n}_j \wedge \vec{R}|} = (\vec{n}_j \wedge \vec{r}) \wedge \vec{n}_j \quad (\text{III.2.14})$$

Nous pouvons caractériser ce mode de déplacement du bloc en remarquant que le vecteur déplacement \vec{s} appartient à la fois à la pyramide des joints (d'après la figure 168) et au plan de glissement P_j :

$$\vec{s} \in (JP_B \cap P_j) \quad (\text{III.2.15})$$

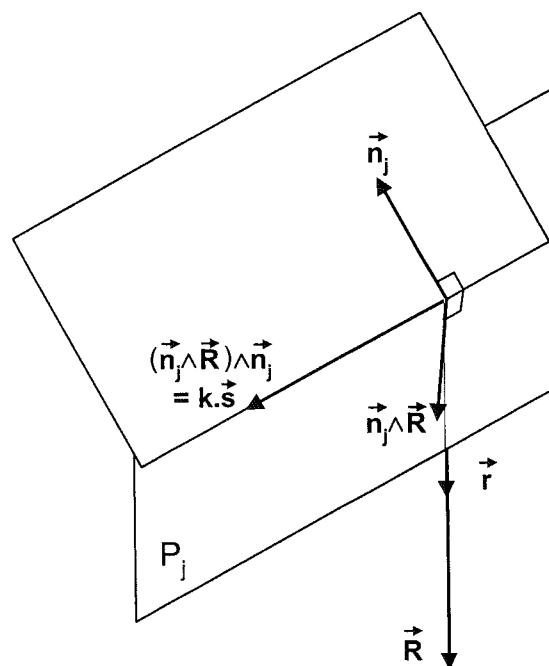


FIG. 177. – Glissement d'un bloc sur une de ses faces (dans le plan P_j). \vec{R} est la résultante des forces extérieures, dont le poids du bloc. \vec{n}_j est le vecteur normal à P_j , unitaire et vers l'intérieur du bloc. Le déplacement \vec{s} se fait selon la ligne de plus grande pente, et dans le sens donné par le vecteur $(\vec{n}_j \wedge \vec{R}) \wedge \vec{n}_j$.

On peut montrer [Goodman et Shi, 1985], que pour une face particulière du bloc, située dans un plan P_j , le vecteur déplacement fait un angle droit ou obtus avec \vec{n}_j , et que pour tout autre plan P_i , $i \neq j$, limitant le bloc, le vecteur déplacement fait un angle aigu avec la normale \vec{n}_i au plan P_i telle qu'elle a été définie ci-dessus.

Autrement formulé :

$$\begin{array}{l} \forall i \neq j, \quad \vec{s} \cdot \vec{n}_i > 0 \\ \text{et} \quad \vec{r} \cdot \vec{n}_j \leq 0 \end{array} \quad (\text{III.2.16})$$

Cette propriété caractéristique est illustrée en 2D par la figure 178.

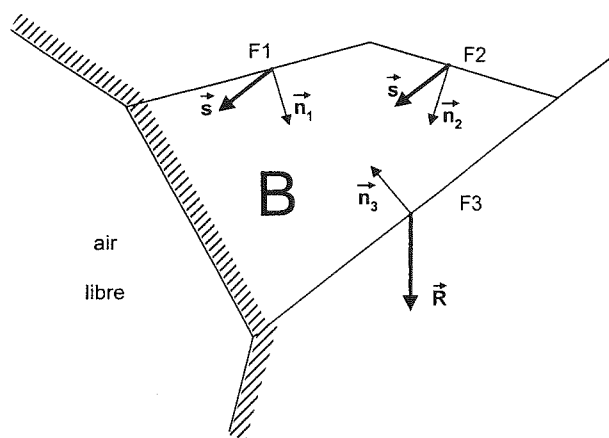


FIG. 178. – Illustration en 2D de la condition de glissement du bloc B sur une seule de ses faces. Pour les faces F1 et F2, on a $\vec{s} \cdot \vec{n}_i > 0$. Pour la face F3, $\vec{R} \cdot \vec{n}_3 < 0$, ce qui indique un déplacement possible selon le vecteur \vec{s} , dans le plan de la face F3.

2.2.6.3. Glissement sur deux faces

Ici, le déplacement se fait selon la droite intersection des deux plans P_i et P_j .

Notons \vec{n}_i le vecteur normal à P_j , unitaire et vers le haut. Le sens du vecteur déplacement unitaire \vec{s} est tel que l'angle $\langle \vec{r}, \vec{s} \rangle$ soit un angle aigu, c'est-à-dire (fig. 179) :

$$\vec{s} = \frac{\vec{n}_i \wedge \vec{n}_j}{|\vec{n}_i \wedge \vec{n}_j|} \text{sign}[(\vec{n}_i \wedge \vec{n}_j) \cdot \vec{r}]$$

où $\text{sign}(x)$ représente 1 si $x > 0$, -1 si $x < 0$, ou 0 si $x = 0$. (III.2.17)

La direction de glissement est une arête de la pyramide des joints, formée par l'intersection des plans P_i et P_j : $\vec{s} \in JP_B \cap P_i \cap P_j$ (III.2.18)

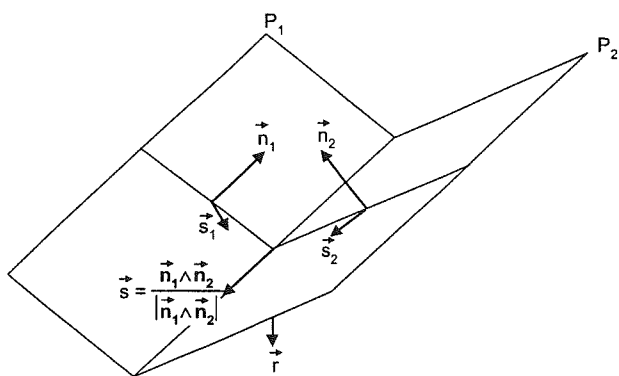


FIG. 179. – Glissement d'un bloc sur deux faces. Les deux plans P_1 et P_2 forment un dièdre. Les \vec{n}_i sont les normales aux faces, orientées vers l'intérieur du bloc. \vec{r} est la résultante des forces extérieures. Les \vec{s}_i sont les projections orthographiques du vecteur \vec{r} sur le plan P_i . On voit que pour ces deux faces, $\vec{n}_1 \cdot \vec{s}_2 \leq 0$ et $\vec{n}_2 \cdot \vec{s}_1 \leq 0$. Le déplacement \vec{s} se fera dans un sens \vec{n}_i tel que le trièdre $(\vec{n}_i, \vec{n}_j, \vec{s})$ soit direct, et l'angle $\langle \vec{r}, \vec{s} \rangle$ soit aigu. Dans le cas de figure représenté, $i=1$ et $j=2$.

Goodman et Shi [1985] ont démontré qu'une condition nécessaire et suffisante pour caractériser le glissement sur deux faces est :

$$\begin{aligned} &\forall k, k \neq i, k \neq j, \vec{n}_k \cdot \vec{s} > 0 \\ &\text{et} \quad \vec{n}_i \cdot \vec{s}_j \leq 0 \\ &\text{et} \quad \vec{n}_j \cdot \vec{s}_i \leq 0 \end{aligned}$$

où \vec{n}_i est le vecteur unitaire et vers l'intérieur du bloc, normal au plan P_i . (III.2.19)

Les résultats ci-dessus nous donnent l'expression de la direction et du sens de glissement sur un plan ou dans un dièdre de la pyramide des joints. D'un point de vue algorithmique, nous devons calculer tous les vecteurs glissement possibles, pour une pyramide des joints donnée, y compris ceux qui physiquement ne peuvent pas donner lieu à un glissement (fig. 180). Pour déterminer la direction effective de glissement, nous devons comparer les composantes Z de chacun de ces vecteurs glissement, et nous retiendrons le vecteur dont la composante Z est maximale en valeur absolue.

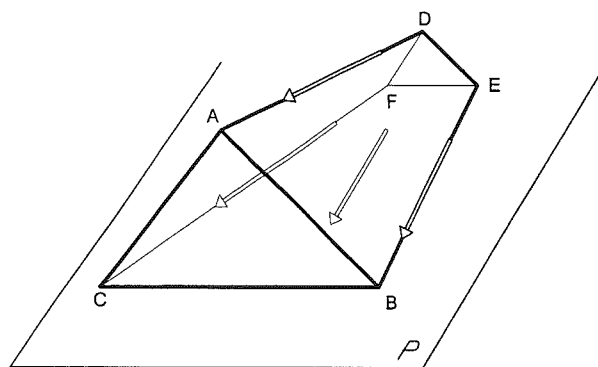


FIG. 180. – Détermination de la direction de glissement effective d'un bloc. Considérons le bloc ci-dessus dans un assemblage de blocs. La face avant, (ABC) est à l'air libre. Toutes les autres faces du bloc, (ABED), (DFE), (ADFC) et (BCFE) sont des joints. Ce bloc est dégagé. On a représenté, en trait double, les directions de glissement potentielles, sur dièdre et sur plan, répondant à l'équation (III.2.10). Parmi ces directions, la direction effective de glissement est celle pour laquelle la composante Z est maximale en valeur absolue. Il s'agit dans ce cas de la direction de glissement sur la face (CBEF), dans le plan P.

Les résultats théoriques étant donnés, nous voyons maintenant l'implémentation pratique dans notre modèle.

2.3. Mise en œuvre pratique dans notre modèle : le code de calcul EBOUL3D

Nous avons développé autour de notre base de données un code de calcul baptisé EBOUL3D mettant en œuvre deux moteurs correspondants à deux objectifs différents. Le premier permet d'identifier les blocs « dégagables » au sens du théorème de Shi, avec

intervention de l'opérateur à chaque étape pour le choix des blocs à dégager. Le second, englobant le premier moteur, prend en compte en outre le calcul des forces de friction selon un modèle simplifié, ainsi que les différents modes possibles pour la sortie du bloc, et il retire automatiquement de l'assemblage le bloc le moins stable selon le critère fixé.

2.3.1. Application du théorème de « dégageabilité »

Ce premier modèle est destiné à examiner, dans les assemblages produits par le moteur de fracturation, la liberté de mouvement de chaque bloc. Il n'est donc pas question ici ni de déterminer une quelconque probabilité de chute du bloc, ni de connaître la façon dont le bloc est dégagé.

2.3.1.1. Description fonctionnelle de l'algorithme

Dans son premier moteur, notre code de calcul EBOUL3D considère un volume cubique initialement fracturé par notre moteur de fracturation OBSIFRAC, et entouré d'air (fig. 181). Nous nommerons faces primitives les faces extérieures de ce cube. Ces faces primitives peuvent être à l'air libre (faces primitives « libres »). Elles peuvent aussi constituer des surfaces au sein de la roche (faces primitives « non libres »).

Certains blocs sont enfermés dans le cube (*joint blocks* au sens de Goodman et Shi [1985] (cas du bloc 18 de la figure 181) et d'autres montrent une face (bloc 13 de la figure 181) ou plusieurs faces (bloc 16 de la figure 181) affleurant à l'air libre sur une face primitive libre.

L'algorithme est le suivant :

(0) Parmi ces blocs affleurant initialement, les blocs libres au sens du théorème de dégageabilité sont repérés par calcul ;

(1) Les blocs libres correspondants sont proposés à l'opérateur dans une liste ;

(2) L'opérateur choisit ensuite dans cette liste un ou plusieurs blocs à dégager ;

(3) L'algorithme procède alors au retrait du ou des bloc(s) choisis ;

(4) Il recalcule ensuite dans cette nouvelle configuration les blocs susceptibles d'être dégagés à leur tour (blocs libres).

Les étapes (1) à (4) peuvent être répétées par l'opérateur, jusqu'au dégagement de tous les blocs.

Il est pertinent de détailler le point (4) de l'algorithme. En particulier, nous voyons maintenant comment caractériser la pyramide des joints, puis quel est le mécanisme de libération des blocs.

2.3.1.2. Caractérisation géométrique de la pyramide des joints

Dans notre modèle, chaque face d'un bloc est issue d'un plan de fracture, dont on conserve dans la base de données l'équation cartésienne.

Par ailleurs, pour chaque face, on mémorise également dans la base un indicateur permettant de connaître la position relative du barycentre du bloc par rapport au plan de la face. Il est donc facile, pour chaque face, d'identifier le demi-espace contenant le bloc (fig. 182).

En prenant en compte toutes les faces de type joints (cf 2.2.2), on peut ainsi caractériser les demi-espaces correspondants et leur intersection, qui donne la pyramide des joints. Le calcul de la pyramide de joints d'un bloc revient, on l'a vu au paragraphe 2.2.2, à résoudre un système de n inéquations, n étant le nombre de faces de la pyramide ou de demi-espaces. Pour n croissant, une résolution analytique formelle de ce système d'inéquations devient de plus en plus difficile. Il est donc nécessaire de recourir à une méthode d'exploration discrète de l'espace 3D. Pour cela, on utilise une grille-test constituée par une série de points répartis sur une sphère.

Légende de la figure 181 :

On considère un cube parcouru par 6 fractures, dont 4 fractures recoupantes, et 2 non recoupantes. On suppose ces plans de fractures tous parallèles à y . Le schéma représente une coupe verticale du cube dans le plan (x,z) . Ces fractures délimitent des blocs, dont les numéros sont portés sur la figure. Nous examinons le cas où les faces 2 et 5 sont les seules faces primitives exposées à l'air libre. Les autres faces primitives (0,1,3,4) doivent être vues comme les limites du cube avec le massif rocheux, donc comme des joints.

En a), l'algorithme examine la face primitive 2 pour y repérer les blocs libres. Seul le bloc libre n° 8 répond au critère de Shi. En effet, sa pyramide de joints, formée par les faces 39 et 40 n'est pas vide. Ce bloc est donc proposé pour être dégagé.

En b), le bloc 8 étant éliminé, les blocs libres sont les blocs 13 et 7. On choisit de faire disparaître le bloc 13. On rend ainsi libres les blocs 15 et 16.

En c), on choisit d'évacuer le bloc 16. A ce stade les blocs libres sont les blocs 15 et 7.

En d), on évacue volontairement le bloc 7. La face 38 étant à l'air libre, les 2 faces 75 et 76 le sont également. Les blocs 15 et 18 sont libres.

En e), on dégage le bloc 18. Aucun nouveau bloc n'est libéré.

En f), on évacue le bloc 15. Il n'y a pas de nouveau bloc libre.

En g), en dégageant le bloc 17, on libère nécessairement immédiatement le bloc 12. En effet, celui-ci n'est plus retenu par aucun autre bloc. Les blocs stables 3 et 5 restent alors seuls dans le système. Remarquons que dans la réalité un nombre important de blocs peut être libéré automatiquement de cette façon, ce qui correspond à un phénomène d'avalanche.

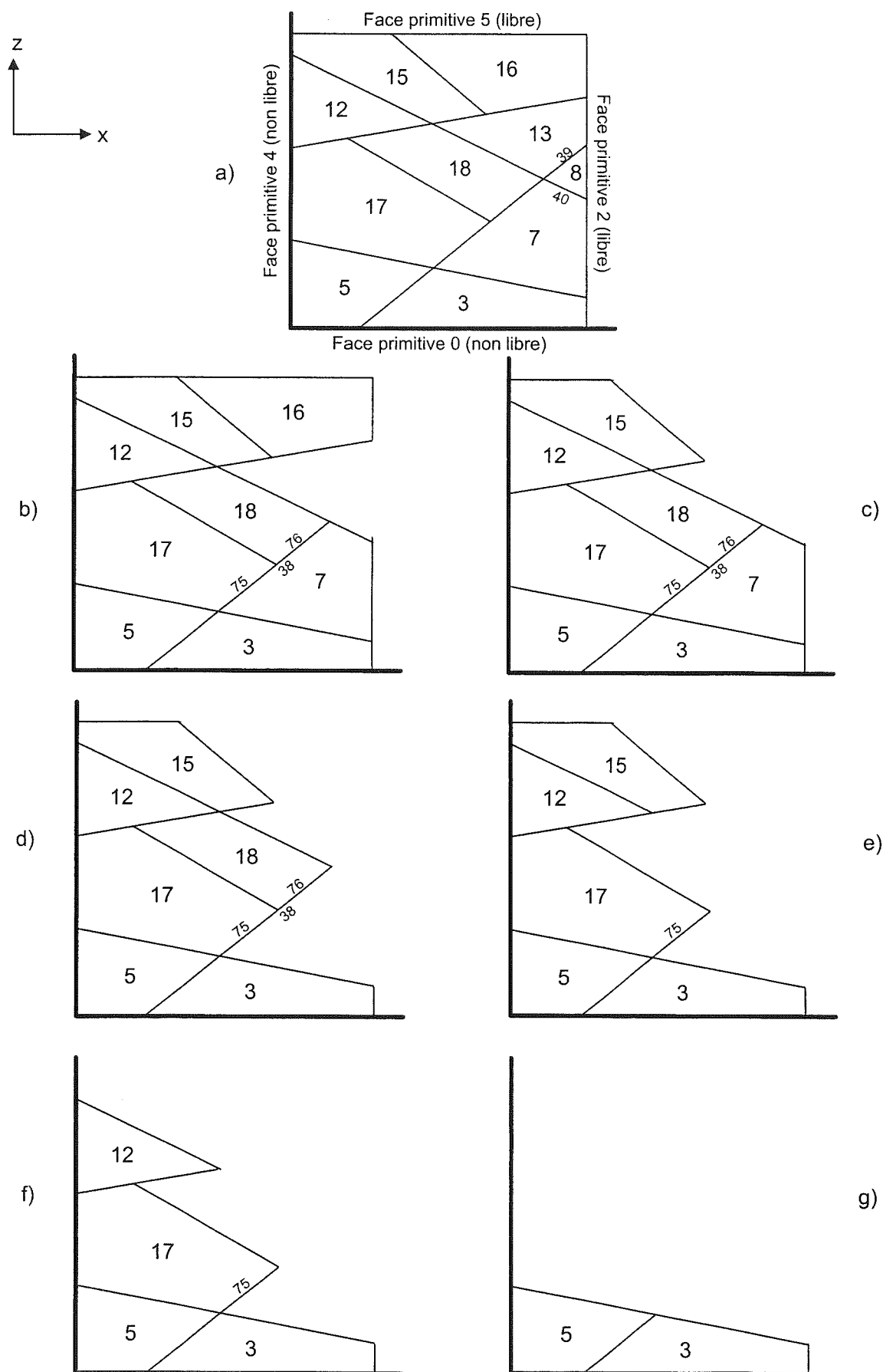


FIG. 181.- Illustration du premier code de calcul : application en 2D du théorème de Shi sur la « dégageabilité » des blocs.

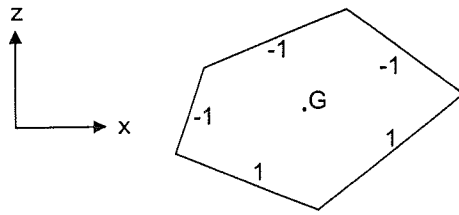


FIG. 182.— Sur un exemple 2D, notation des plans des faces d'un bloc selon leur position par rapport au barycentre G du bloc. La face porte l'indicateur -1 si le barycentre, donc le bloc est au-dessous de cette face ; elle porte 1 si le barycentre est au-dessus.

Ces points sont définis par leurs coordonnées sphériques (R, θ, φ) (fig. 183), et par leurs coordonnées cartésiennes :

$$M \begin{cases} R \cdot \sin \varphi \cdot \cos \theta \\ R \cdot \sin \varphi \cdot \sin \theta \\ R \cdot \cos \varphi \end{cases} \quad \text{avec } R \text{ constant} \quad (\text{III.2.20})$$

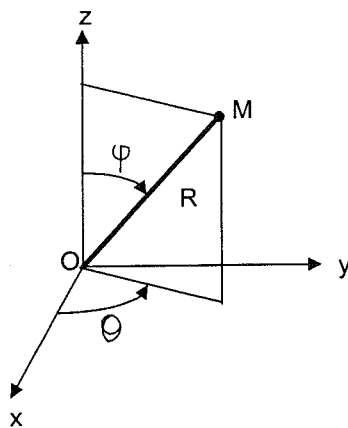


FIG. 183.— Exploration discrète de l'espace 3D par des points M définis en coordonnées sphériques.

On fait varier les valeurs de θ et de φ de façon à explorer toute la sphère, avec un incrément paramétrable :

$$\begin{cases} 0 \leq \theta < 2\pi \\ 0 \leq \varphi < \pi \end{cases} \quad (\text{III.2.21})$$

La présence ou l'absence de chaque point M de la grille sphérique dans la pyramide des joints est déterminée en testant si les coordonnées de M sont solutions du système d'inéquations. L'existence d'au moins un point solution montre que cette pyramide n'est pas vide et que le bloc est libre.

2.3.1.3. Mécanisme de libération des blocs

La pyramide des joints est constituée, pour chaque bloc affleurant, selon la méthode décrite au paragraphe précédent. Un bloc dont la pyramide des joints est non

vide, et que l'on a choisi de dégager, doit être enlevé. Cette opération est effectuée en marquant chaque face du bloc à enlever comme étant à l'air libre. Dans les cas simples où le plan de fracture sépare deux faces d'égale forme et surface, on provoque la libération d'une face *entière* sur l'assemblage restant en place. Ce cas de figure est celui d'un découpage par fractures recoupantes (fig. 184A). En revanche, dans le cas général d'un découpage par fractures non recoupantes, la libération d'une face du bloc enlevé peut se traduire par une libération

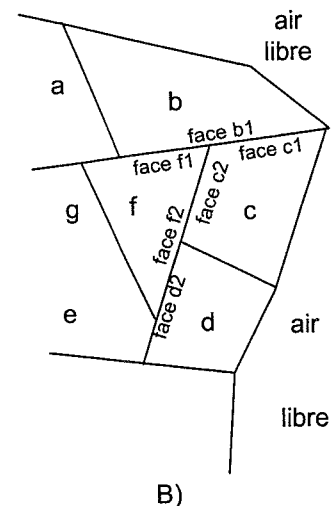
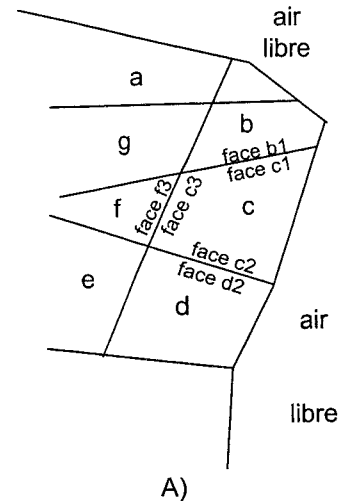


FIG. 184.— Illustration des deux cas de dégagement des blocs. En A), lors du dégagement de l'un des blocs b, c, ou d, on met à l'air libre sur l'assemblage restant en place, une face de mêmes forme et taille que celle qui existait sur le bloc enlevé. Ainsi, les faces b1 et c1, c3 et f3, c2 et d2 sont « jumelles ». En B), lors du dégagement du bloc c, on libère la face c1, mais la face b1 du bloc b n'est libérée que partiellement. Lors de la même opération, la face c2 est mise à l'air libre également, libérant partiellement la face f2. Ce n'est qu'après le départ du bloc d que cette face f2 sera libérée totalement. Le bloc f pourra alors être évacué, la face f1 sera libérée. La face b1 étant alors entièrement libérée, le bloc b partira.

partielle, d'une ou plusieurs faces sur le système de blocs restant en place (fig. 184B). Dans ce cas, nous devons donc mémoriser cette libération partielle, en repérant la libération de chaque nœud de la face individuellement. Un nœud libéré restera libre dans la suite du processus. A chaque étape, nous déterminons les nœuds libérés, puis les faces dont tous les nœuds sont libres qui sont, par conséquent, libres à leur tour. Nous obtenons de cette façon les faces à l'air libre d'un bloc et, par déduction, les faces de ce bloc qui formeront la pyramide des joints.

2.3.2. Hypothèses complémentaires

Dans le but de simplifier la modélisation, nous complétons ici les hypothèses formulées plus haut (§ 2.1 et 2.2.6).

2.3.2.1. Action exclusive de la gravité

Dans la suite du propos, nous considérons l'action des forces extérieures comme négligeable devant le poids du bloc.

Mode de déplacement	Vecteur déplacement du bloc	Caractérisation du mode de déplacement
<i>SOULEVEMENT ou DECOLLEMENT</i> cf. (III.2.10) et (III.2.12)	<i>Vertical vers le bas</i> $\vec{s} = \vec{r} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix}$	$\forall i, \vec{s} \cdot \vec{n}_i > 0$ s'écrit $f_i < 0$
<i>GLISSEMENT SUR UN SEUL PLAN</i> cf. (III.2.14), (III.2.15), (III.2.16)	<i>Ligne de plus grande pente de P_i</i> $\vec{s} = \frac{1}{\sqrt{a_i^2 + b_i^2}} \cdot \begin{pmatrix} a_i c_i \\ b_i c_i \\ -(a_i^2 + b_i^2) \end{pmatrix}$	$\forall i, i \neq j, \vec{s} \cdot \vec{n}_i > 0,$ et $f_j \geq 0$
<i>GLISSEMENT SUR DEUX PLANS P_i et P_j</i> cf. (III.2.17), (III.2.18), (III.2.19)	<i>Droite intersection de P_i et P_j, vers le bas</i> $\vec{s} = \text{sign}(a_j c_i - a_i c_j) \cdot \begin{pmatrix} b_i c_j - b_j c_i \\ a_j c_i - a_i c_j \\ a_i c_j - a_j c_i \end{pmatrix}$	$\forall k, k \neq i, k \neq j, \vec{n}_k \cdot \vec{s} > 0$ et $\vec{n}_i \cdot \vec{s} \leq 0$ et $\vec{n}_j \cdot \vec{s} \leq 0$
<i>BLOC STABLE</i>	<i>Aucun déplacement</i> $\vec{s} = \vec{0}$	$\vec{r} \notin JP$ et $\forall i, \vec{s}_i \notin JP$ et $\forall i, j, \vec{s}_{ij} \notin JP$

FIG. 185.- Vecteur unitaire déplacement \vec{s} du bloc, et caractérisation pour les quatre modes possibles de déplacement d'un bloc soumis à son seul poids. Nous notons \vec{h}_i la normale unitaire et vers le haut, à la face du plan P_i , et \vec{n}_i la normale à la face du plan P_i , unitaire et vers l'intérieur du bloc :

$$\vec{h}_i = \begin{pmatrix} a_i \\ b_i \\ c_i \end{pmatrix} \quad \vec{n}_i = \begin{pmatrix} d_i \\ e_i \\ f_i \end{pmatrix} \quad (\text{III.2.22})$$

Le déplacement éventuel n'est donc dû qu'au seul poids du bloc. Nous avons :

$$\vec{R} = \vec{P} \text{ avec } \vec{R} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -M \cdot g \end{pmatrix} \text{ et } \vec{r} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} \quad (\text{III.2.23})$$

où M est la masse du bloc, et g l'accélération de la pesanteur.

Avec cette hypothèse, les résultats présentés dans les paragraphes précédents sont repris sur la figure 185.

2.3.2.2. Modélisation de la friction

Sans prétendre ici à une revue exhaustive des modèles de friction, nous précisons comment ce paramètre a été pris en compte dans notre modèle. Nous avons volontairement choisi de représenter le phénomène de friction par un modèle fortement simplificateur. Cette représentation pourra être enrichie par des modèles plus sophistiqués, plus à même de rendre compte de la complexité de ce processus.

Principaux modèles mathématiques

L'approche expérimentale par la loi d'Amonton [Bowden et Tabor, 1950] montre une proportionnalité entre la *force de friction* T s'opposant à la mise en mouvement, et la *charge normale* N (force pressant l'une contre l'autre les surfaces en contact) :

$$T = \mu \cdot N \quad (\text{III.2.24})$$

ou encore, en divisant par la surface de contact :

$$\tau = \mu \sigma \quad (\text{III.2.25})$$

où τ et σ sont respectivement les contraintes tangentielles et normales.

Le paramètre μ est appelé coefficient de friction. Il dépend de la nature du matériau et de la rugosité des surfaces. La force de friction est donc indépendante de la taille des surfaces en contact, et ne dépend que du poids du bloc. Ce résultat signifie concrètement que sur un plan d'inclinaison donnée, à poids égal, un bloc présentant une grande surface de contact glissera aussi facilement qu'un bloc montrant une surface de contact plus réduite.

Jaeger [1959] introduit une composante adhésive S_0 qui donne des résultats satisfaisants, particulièrement pour les contraintes faibles :

$$\tau = S_0 + \mu \sigma \quad (\text{III.2.26})$$

Cette loi n'est plus vraie en présence de rugosité très importante. Archard (1958) a montré qu'une modélisation plus satisfaisante était obtenue en prenant en compte l'existence probable entre les deux surfaces d'un grand nombre de points de contact subissant des charges différentes. La déformation est alors plastique en certains points, élastiques en d'autres points. L'auteur

conclut à l'expression de la friction en loi puissance :

$$T = \mu \cdot N^m \quad (\text{III.2.27})$$

avec $2/3 < m < 1$, le cas $m = 2/3$ correspondant à un contact élastique pur. Murrell [1965] parvient de la même façon à vérifier expérimentalement la loi :

$$\tau = \mu_0 \sigma^m \quad (\text{III.2.28})$$

avec μ_0 et m constants pour une large gamme de valeurs de σ . Les techniques récentes d'investigation microscopique ont effectivement expliqué la loi d'Amonton par le fait qu'un accroissement de la charge normale provoque une déformation élastique, puis plastique des aspérités du bloc et du support, entraînant une augmentation de la surface réelle de contact. Une meilleure compréhension de la friction a été apportée par des modèles intégrant l'aspect dissipatif de ce phénomène [Maveyraud, 1998].

En amont de ces considérations avancées, la loi d'Amontons reste vérifiée et utilisable pratiquement dans une modélisation macroscopique simple. Nous nous limiterons donc à ce cadre de la friction solide sèche (sans fluide interposé).

Valeurs du coefficient de friction

Le paramètre μ envisagé ci-dessus est relatif à l'initiation du glissement, et représente un coefficient de friction *statique*. Or, l'expérimentation prouve qu'au cours d'un glissement à vitesse constante, la proportionnalité entre force de friction et charge normale existe également. Le coefficient de proportionnalité est alors nommé coefficient de friction *dynamique* μ' . Ses valeurs sont inférieures à celles de μ et varient avec la vitesse de glissement [Jaeger et Cook, 1969].

Roches testées	Valeur de μ	Valeur de Φ
Grès	0,51 - 0,68	27 - 34
Granite	0,60 - 0,64	31 - 33
Quartzite	0,48 - 0,67	26 - 34
Dolérite	0,64 - 0,95	33 - 44
Dolomite	0,4	22
Trachyte	0,56 - 0,63	29 - 32
Marbre	0,62 - 0,75	32 - 37
Porphyre	0,86	41
Gneiss	0,61 - 0,71	31 - 35
Gabbro	0,18 - 0,66	10 - 33

FIG. 186. - Quelques valeurs du coefficient de friction μ et de l'angle de friction Φ pour diverses roches. D'après Jaeger et Cook [1969].

L'expérimentation s'adresse la plupart du temps au coefficient statique. Les méthodes employées pour la mesure de m varient (application directe de forces normales et tangentielles sur un bloc posé sur un plan,

dispositifs rotatifs, essais triaxiaux,...). Elles reviennent toutes à représenter τ en fonction de σ , et à évaluer μ par la pente de la droite obtenue. Nous donnons quelques valeurs moyennes de la littérature (fig. 186).

Le coefficient de friction μ peut être exprimé sous la forme d'une tangente. L'angle correspondant est nommé *angle de friction* Φ :

$$\mu = \operatorname{tg} \Phi \quad (\text{III.2.29})$$

La force entraînant le bloc en glissement sur un seul plan d'inclinaison β , et donnée par (III.2.32), est représentée ci-dessous pour un bloc de poids unitaire (fig. 187). Le poids du bloc n'intervient ni sur la valeur limite, ni sur l'allure des courbes, mais seulement sur l'échelle de force. Cette force est négative pour $\beta < \Phi$, indiquant que le glissement n'est pas spontané. Elle s'annule pour $\beta = \Phi$ et devient positive pour $\beta > \Phi$. L'angle Φ est l'angle de pendage limite du plan de friction au-delà duquel le glissement devient possible. Les valeurs moyennes de Φ référencées en géotechnique s'échelonnent entre 10° et 40° .

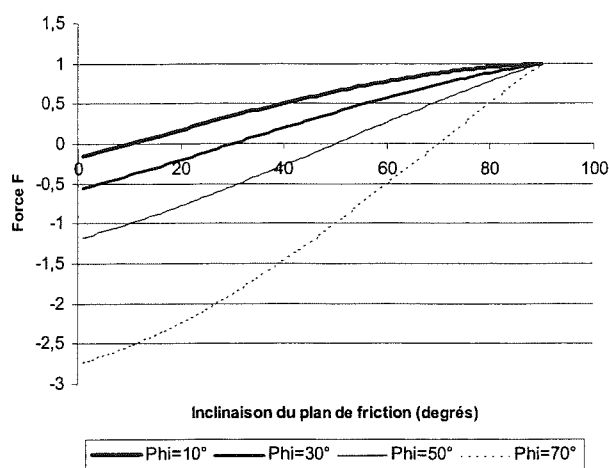


FIG. 187. – Valeur de la force F entraînant un bloc de poids unitaire en glissement sur un seul plan d'inclinaison β , pour diverses valeurs de l'angle de friction Φ .

Nous avons retenu pour notre étude une valeur de μ égale à 0,466, et correspondant à un angle de friction $\Phi = 25^\circ$. Le choix d'une valeur assez faible est destinée, dans le cadre de notre expérimentation, à atteindre une vidange importante de notre assemblage de blocs, pour obtenir un nombre de blocs propre à fournir des statistiques significatives.

2.3.3. Simulation du mécanisme de l'éboulement

Ce second moteur permettra de simuler un éboulement fictif en provoquant le retrait successif des blocs les plus instables au sens du critère que nous avons retenu. Pour cela, nous devons déterminer, à chaque état du système quels sont les blocs pour lesquels le

dégagement est le plus probable, ainsi, comme dans le cas précédent, que la façon dont ils sortiront de l'assemblage.

La caractérisation de la stabilité du bloc, ou du mode de dégagement dans le cas des blocs instables (décollement, glissement sur une face, glissement sur deux faces) a été présentée plus haut (III.2.21).

Par définition, les blocs décollants ne sont soumis à aucune friction. Ils seront donc évacués immédiatement. Par contre, pour les blocs glissants, la force fictive \vec{F} introduite précédemment, qui tend à entraîner le bloc servira de critère pour dégager ou non chaque bloc. Nous présentons ici le calcul de cette force de glissement.

2.3.3.1. Forces de glissement

Cas du glissement sur un plan

Les hypothèses que nous avons formulées sur la friction au § 2.3.2.2 nous permettent d'écrire :

$$\vec{T} = -\mu \cdot N \cdot \vec{s}, \text{ ou, pour les modules, } T = \mu \cdot N \quad (\text{III.2.30})$$

La force à opposer pour retenir le bloc est $\vec{F} = -F \cdot \vec{s}$. D'après (III.2.8), nous avons :

$$-\mu \cdot N \cdot \vec{s} - F \cdot \vec{s} = -S \cdot \vec{s} \quad (\text{III.2.31})$$

La force F est donc :

$$F = S - \mu \cdot N \quad (\text{III.2.32})$$

En exprimant l'équilibre à l'aide de 2 projections, (fig. 173) d'une part dans le plan vertical, et d'autre part sur le plan de glissement, on obtient successivement, en considérant notre hypothèse de gravité :

$$N = P \cdot \cos \alpha, \text{ et}$$

$$S = P \sin \alpha \quad (\text{III.2.33})$$

où α désigne l'inclinaison du plan de glissement.

En remplaçant dans (III.2.28) $F = S - \mu \cdot N$, nous obtenons le module de la force de glissement du bloc :

$$F = P \cdot (\sin \alpha - \mu \cdot \cos \alpha) \quad (\text{III.2.34})$$

ou encore, si le plan de glissement est défini par son

équation cartésienne $P_j(a, b, c)$, a, b, c étant tels que $c > 0$ (vecteur normal dirigé vers le haut) :

$$F = P \cdot (\sqrt{a^2 + b^2} - \mu \cdot c) \quad (\text{III.2.35})$$

Cas du glissement sur deux plans

Par analogie avec le cas précédent (III.2.32), nous pouvons écrire (fig. 179) :

$$F = S - \mu_1 \cdot N_1 - \mu_2 \cdot N_2 \quad (\text{III.2.36})$$

Cherchons à exprimer chacun des termes de droite, en commençant par N_1 et N_2 .

$$\vec{P} + N_1 \cdot \vec{n}_1 + N_2 \cdot \vec{n}_2 - S \cdot \vec{s} = \vec{0}, \text{ avec } N_1, N_2, T \geq 0 \quad (\text{III.2.37})$$

En faisant le produit vectoriel avec \vec{n}_2 de chaque membre, de cette égalité, puis en prenant le produit scalaire avec $(\vec{n}_1 \wedge \vec{n}_2)$, on obtient :

$$(\vec{P} \wedge \vec{n}_2) \cdot (\vec{n}_1 \wedge \vec{n}_2) + N_1 (\vec{n}_1 \wedge \vec{n}_2) \cdot (\vec{n}_1 \wedge \vec{n}_2) - S \cdot (\vec{s} \wedge \vec{n}_2) \cdot (\vec{n}_1 \wedge \vec{n}_2) = 0 \quad (\text{III.2.38})$$

D'après (III.2.17), $\vec{n}_1 \wedge \vec{n}_2$ est parallèle à \vec{s} , et comme $\vec{s} \perp \vec{s} \wedge \vec{n}_2$, le dernier terme est nul. Il s'ensuit :

$$N_1 = \frac{-(\vec{P} \wedge \vec{n}_2) \cdot (\vec{n}_1 \wedge \vec{n}_2)}{(\vec{n}_1 \wedge \vec{n}_2) \cdot (\vec{n}_1 \wedge \vec{n}_2)} \quad (\text{III.2.39})$$

et puisque $N_1 \geq 0$,

$$N_1 = \frac{|(\vec{P} \wedge \vec{n}_2) \cdot (\vec{n}_1 \wedge \vec{n}_2)|}{(\vec{n}_1 \wedge \vec{n}_2) \cdot (\vec{n}_1 \wedge \vec{n}_2)} \quad (\text{III.2.40})$$

De la même façon,

$$N_2 = \frac{|(\vec{P} \wedge \vec{n}_1) \cdot (\vec{n}_1 \wedge \vec{n}_2)|}{(\vec{n}_1 \wedge \vec{n}_2) \cdot (\vec{n}_1 \wedge \vec{n}_2)} \quad (\text{III.2.41})$$

Pour exprimer S , nous reprenons (III.2.33), en faisant le produit scalaire avec \vec{s} . On obtient $\vec{P} \cdot \vec{s} + 0 + 0 - S = 0$, d'où :

$$S = \vec{P} \cdot \vec{s} = \frac{\vec{P} \cdot (\vec{n}_1 \wedge \vec{n}_2)}{|\vec{n}_1 \wedge \vec{n}_2|} \quad (\text{III.2.42})$$

En remplaçant (III.2.40), (III.2.41) et (III.2.42) dans (III.2.36), on a l'expression de la force de glissement dans un dièdre :

$$F = \frac{1}{|\vec{n}_1 \wedge \vec{n}_2|^2} \left[\left| \vec{P} \cdot (\vec{n}_1 \wedge \vec{n}_2) \right| |\vec{n}_1 \wedge \vec{n}_2| - \mu_1 |(\vec{P} \wedge \vec{n}_2) \cdot (\vec{n}_1 \wedge \vec{n}_2)| \right. \\ \left. - \mu_2 |(\vec{P} \wedge \vec{n}_1) \cdot (\vec{n}_1 \wedge \vec{n}_2)| \right] \quad (\text{III.2.43})$$

Nous posons $\mu_1 = \mu_2 = \mu$,

$$\vec{n}_1 \begin{vmatrix} n_{1x} \\ n_{1y} \\ n_{1z} \end{vmatrix}, \quad \vec{n}_2 \begin{vmatrix} n_{2x} \\ n_{2y} \\ n_{2z} \end{vmatrix}, \quad \vec{n}_1 \wedge \vec{n}_2 \begin{vmatrix} N_x \\ N_y \\ N_z \end{vmatrix}$$

$$\text{et} \quad A = \sqrt{N_x^2 + N_y^2 + N_z^2}$$

On obtient finalement :

$$F = \frac{P}{A^2} [A |N_z| - \mu (N_x n_{2y} + N_y n_{2x}) - |N_x n_{1y} + N_y n_{1x}|] \quad (\text{III.2.44})$$

2.3.3.2. Description fonctionnelle de l'algorithme

Le volume modélisé est constitué d'un parallélépipède pré-fracturé, pour lequel l'opérateur choisit la ou les face(s) initialement à l'air libre, susceptibles d'être le siège d'éboulements. Les paramètres physiques, densité du matériau d et coefficient de friction m sont donnés en entrée. D'un point de vue pratique, les valeurs retenues pour l'étude sont des valeurs moyennes, soit $d=2,2$ et $\mu=0,466$ qui correspond à un angle de friction $F=25^\circ$.

La principe général est le suivant : Parmi les blocs dégageables repérés à chaque phase de l'éboulement, les blocs les plus instables sont les blocs décollants. Ils sont donc évacués en premier. Lorsqu'il n'y a plus de bloc décollant, c'est le bloc glissant le plus instable qui quitte l'assemblage. Le retrait d'un tel bloc peut provoquer l'apparition de nouveaux blocs décollants, qui seront évacués à leur tour, etc... (fig. 188).

Le programme produit une table où sont archivés, pour chaque étape, les blocs libres, qu'ils aient été finalement dégagés ou non, avec leur direction de glissement réelle, le type de dégagement optimal envisagé, et la force F qu'ils subissent.

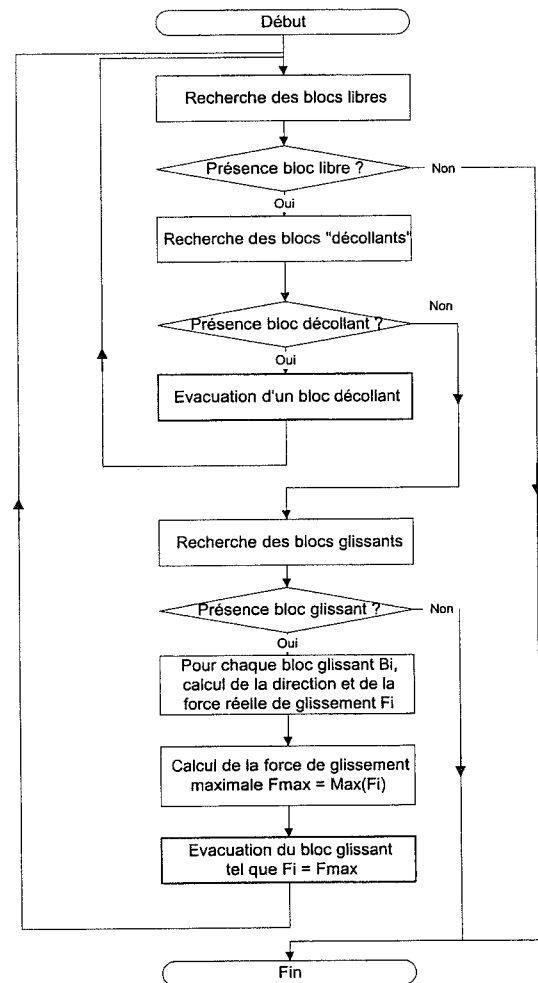


FIG. 188.- Organigramme simplifié de l'algorithme d'évacuation des blocs libres. L'évacuation d'un bloc quel qu'il soit est susceptible de modifier la stabilité des blocs voisins. Pour cette raison, le déroulement du programme est séquencé en étapes correspondant chacune à l'évacuation d'un bloc unique. Pour chaque étape, on inventorie les blocs libres au sens de Shi. Le modèle initial pouvant éventuellement correspondre à un assemblage instable, on recherche d'abord les blocs susceptibles de quitter naturellement le système (blocs décollants). On évacue ces blocs un par un, en recherchant à chaque fois la présence de nouveaux blocs décollants, jusqu'à épuisement. Cette évacuation « naturelle » des blocs décollants correspond à une avalanche. Lorsqu'il n'y a plus de bloc décollant, on cherche pour chaque bloc glissant sa direction de glissement (cf. 2.2.6) et sa force de glissement (cf. 2.3.3.1). On détermine alors le bloc dont le glissement est le plus probable, puis on le retire de l'assemblage. Le retrait de ce bloc glissant rend alors nécessaire une nouvelle recherche des blocs libres, et le processus recommence.

3.- APPLICATIONS

Dans cette partie, nous proposons de montrer l'intérêt potentiel de notre modèle de blocs dans l'étude de stabilité d'escarpements rocheux. Une exploration exhaustive et systématique utilisant toutes les possibilités du modèle pour qualifier, voire quantifier l'aléa dépasse largement le cadre de ce travail. L'aléa d'éboulement est le résultat du double concours d'une prédisposition structurale et d'une topographie propice [Jaboyedoff *et al.*, 1996]. La confrontation agencement structural – topographie est à la base de certaines méthodes de détermination des aléas [Rouiller *et al.*, 1998]. Nous ne nous adresserons pas ici aux variations du facteur topographie, largement étudié par ailleurs [Young, 1972 ; Wagner *et al.*, 1990 ; Goudie, 1990 ; Thornes *et al.*, 1977] et nous nous limiterons à quelques exemples, en appliquant le modèle à des parois initialement verticales. Le cas fréquent de parois non verticales peut cependant être traité de façon similaire par le modèle EBOUL3D.

Nous présenterons ici successivement trois paramètres étudiés qui nous ont semblés *a priori* déterminants dans le maintien ou la rupture d'équilibre :

- l'orientation relative des plans de fractures découpant le massif par rapport à la paroi libre ;
- le caractère recoupant ou non des discontinuités ;
- le processus de fractionnement utilisé pour la génération de l'assemblage de blocs. Celui-ci conditionne une plus ou moins grande hétérogénéité dans les volumes de blocs.

Pour l'étude de ces trois paramètres, détaillée dans les trois paragraphes ci-après, nous avons choisi les scénarios de découpage A et B. D'une part, nous jugeons

que ces processus ont tous deux une vraisemblance dans le cadre du milieu naturel, tant du point de vue des images de réseaux qu'ils produisent (voir Seconde Partie), que même en termes génétiques (voir Troisième Partie, Soultz-sous-Forêts). D'autre part, ce choix est destiné à analyser l'effet de l'existence d'un contraste important dans le volume des blocs. Le processus B génère un assemblage dans lequel les blocs ont des volumes comparables. Au contraire, le processus A donne naissance à de fortes différences de tailles de blocs.

3.1. Effet de l'attitude des plans de fractures

Nous présentons ici des essais réalisés sur des découpages de type A. Il nous paraît en effet intéressant d'étudier, par l'intermédiaire de ce processus de découpage, le comportement différentiel des blocs en fonction de leur taille.

3.1.1. Cas limites de stabilité des blocs affleurants

L'expulsion des blocs affleurant sur la paroi verticale sera rendue possible par l'existence de directions privilégiées de glissement orientées vers l'extérieur de la paroi.

Il est bien connu que le risque d'éboulement par glissement est maximum lorsque la fracturation a les caractéristiques suivantes :

- direction des fractures parallèle à la paroi verticale,
- plongement vers l'extérieur de l'escarpement (fig. 189a)

Au contraire, la prédominance de plans dont le plongement est orienté vers l'intérieur du massif a tendance à stabiliser le dispositif et à minimiser le risque d'éboulement par glissement (fig. 189b).

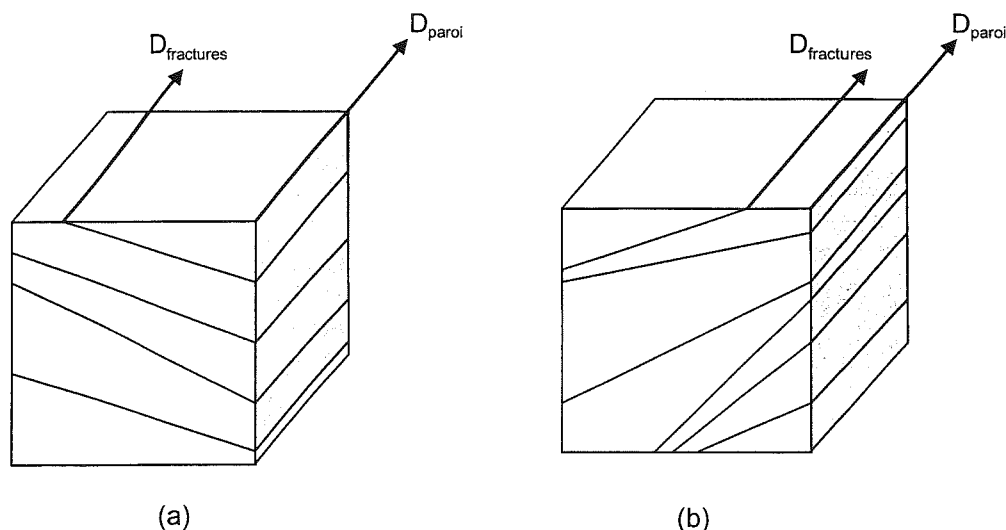


Fig. 189.- Rôle de l'orientation des fractures dans le risque de glissement des blocs : cas où la direction du plan de la paroi D_{paroi} est parallèle à la direction dominante des plans de fractures $D_{fractures}$. Plan de paroi en grisé. (a) Les plans de fractures plongent vers l'extérieur de la paroi, maximisant l'existence de plans de glissement, et donc la probabilité d'expulsion de blocs. (b) Les plans de fractures plongent vers l'intérieur de la paroi, et le glissement tend à s'effectuer dans ce sens. Aucune évacuation de bloc n'est possible.

Nous avons vérifié ces hypothèses à travers plusieurs simulations.

Ces simulations sont réalisées dans un volume cubique, sur lequel la face supérieure et la face sud seulement sont rendues libres (fig. 190).

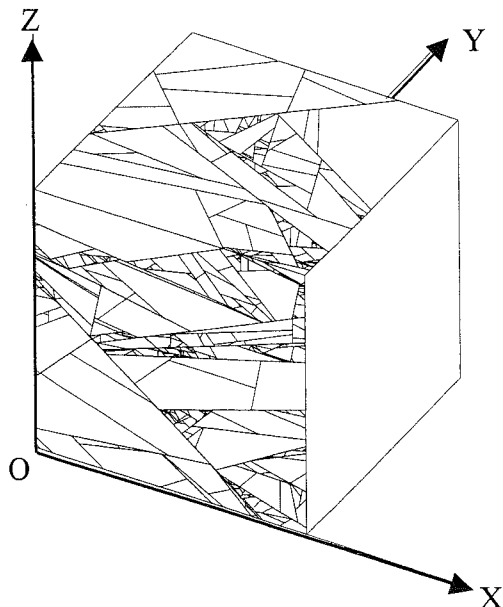
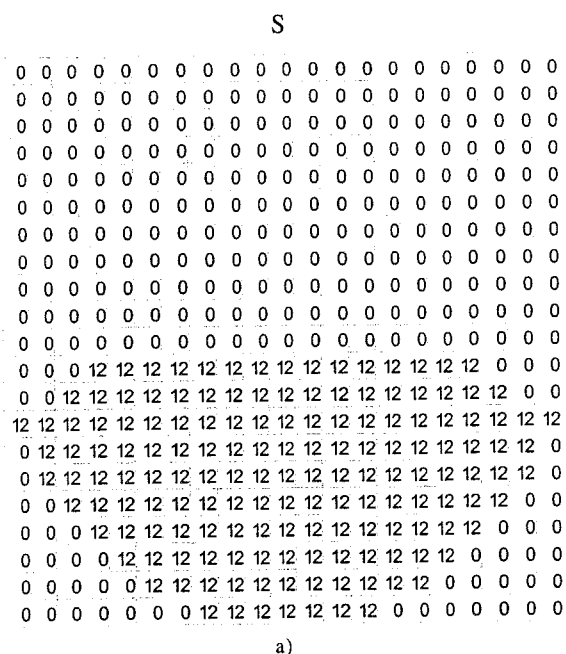


FIG. 190. – Simulation d'éboulement des figures 191 et 192. La face Sud (normale OY) et la face supérieure (où sont figurées ici les traces de fractures) sont les seuls plans de friction nulle, exposés à l'air libre, sur lesquels l'évacuation des blocs est possible. Sur les 3 autres faces latérales et sur la face inférieure, on n'aura aucun déplacement de bloc.



a)

3.1.1.1. Édifice à stabilité maximale

Pour cette simulation, correspondant au cas de la figure 189b, nous avons réalisé 1848 fractures de plongement nord dominant. Ces fractures affectent des blocs tirés aléatoirement (simulation de type « A », cf. Seconde Partie). La paroi à l'air libre, sur laquelle on teste les éboulements, regarde vers le sud (fig. 191).

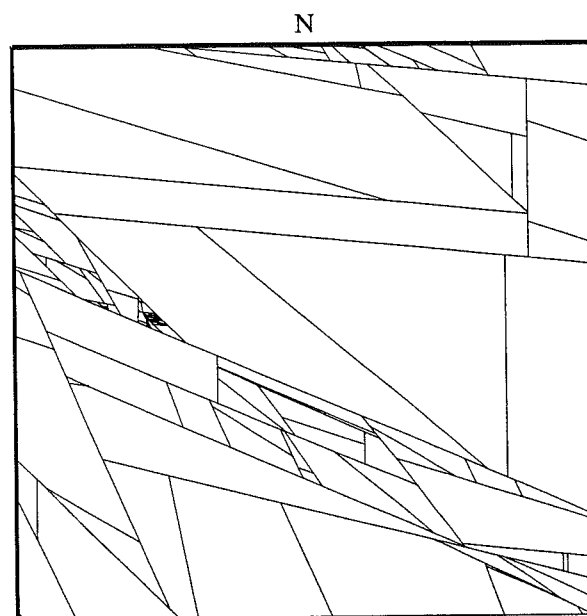
La face à l'air libre (fig. 192) montre 222 blocs affleurants. La grande disparité des surfaces visibles de ces blocs est due au type de simulation « A » utilisé.

Parmi ces 222 blocs affleurants, 138 sont bloqués géométriquement (*tapered* au sens de Goodman et Shi) et 84 peuvent être dégagés vers le haut. La force F est dans ce cas négative. Aucun bloc n'est susceptible de glisser naturellement, c'est-à-dire vers le bas, et ceci quel que soit l'angle de friction F choisi pour la simulation. Ceci est le résultat logique attendu. Il est simplement destiné à vérifier la robustesse de notre algorithme.

Indépendamment de l'orientation particulière des fractures, on note dans cette simulation un nombre relativement élevé de blocs coincés (138 sur 222). Les systèmes de fractures qui verrouillent le bloc sont donc relativement fréquentes dans cet essai.

3.1.1.2. Édifice à stabilité minimale

Cette simulation prend en compte 1848 fractures de plongement globalement sud correspondant au cas de la figure 189a. Les blocs à fracturer sont, comme dans le cas précédent, tirés aléatoirement (simulation de type « A », cf. Partie II) et la paroi laissée à l'air libre regarde toujours vers le sud (fig. 193).



b)

FIG. 191. – Simulation d'éboulement réalisée sur un bloc rocheux parcouru par une fracturation d'orientation E-W, d'inclinaison dominante de secteur nord. 1848 fractures non recoupantes. a) Matrice des pôles de fractures (Schmidt hémisphère inférieure). b) Coupe verticale N-S dans le modèle. La paroi à l'air libre est représentée par le trait épais (orientation E-W). Tous les blocs affleurant sur la paroi sont stables, et aucun départ de bloc n'est constaté.

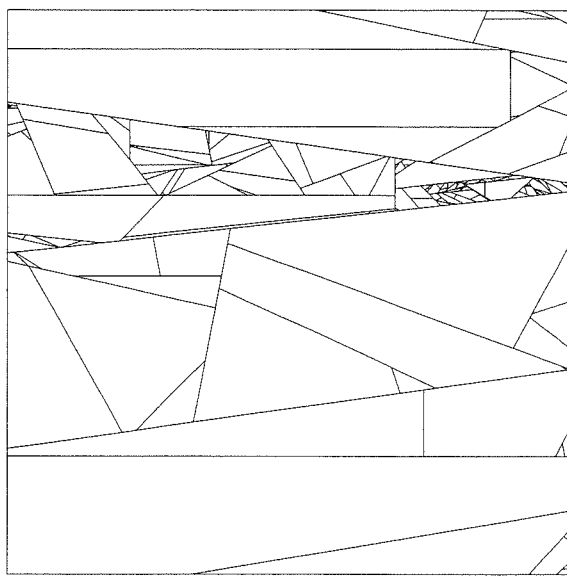


Fig. 192.- Vue de face de l'escarpement, vers le nord. 222 blocs élémentaires affleurant, dont 84 pourraient être dégagés sous l'action d'une force exercée vers le haut.

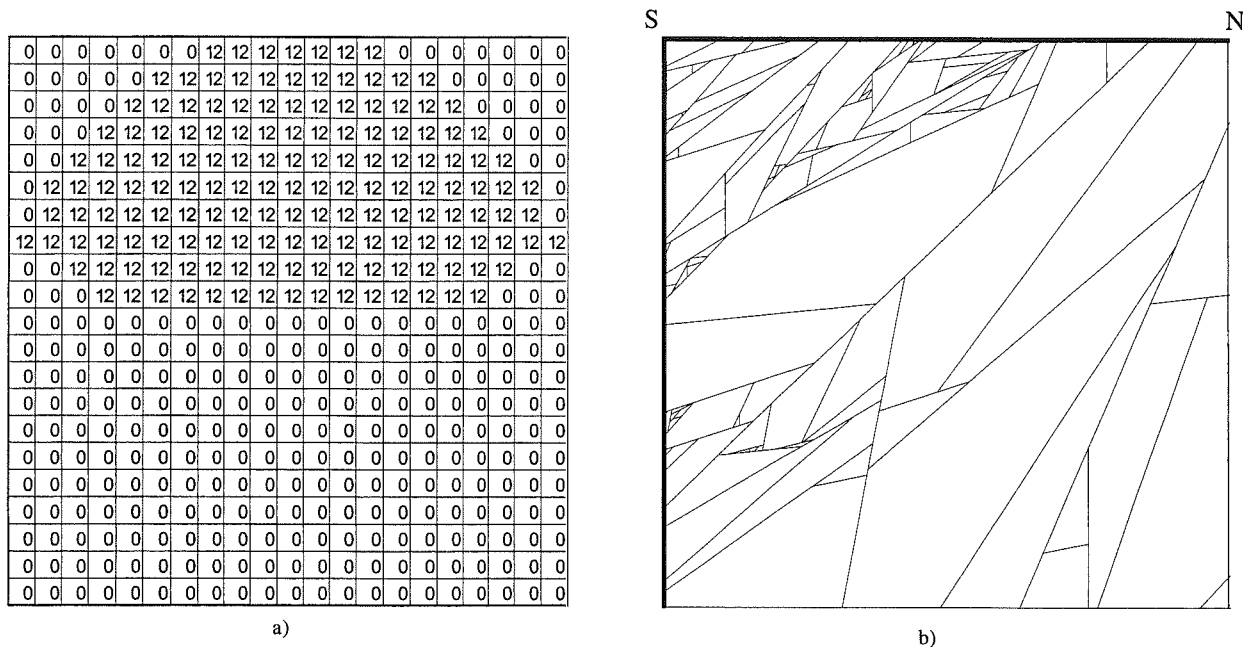


Fig. 193.— Simulation d'éboulement réalisée sur un bloc rocheux parcouru par une fracturation d'orientation E-W, d'inclinaison dominante de secteur Sud. 1848 fractures non recoupantes. a) Matrice des pôles de fractures (Schmidt hémisphère inférieure) correspondant au jeu de fractures parcourant le bloc modélisé dans la figure 195. b) Coupe verticale N-S dans le modèle. La paroi à l'air libre est représentée par le trait épais (orientation E-W).

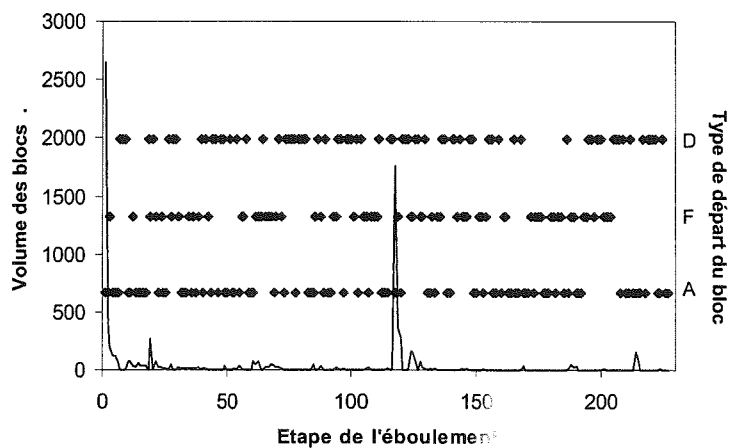


Fig. 194.— Diagramme séquentiel d'un éboulement simulé dans une configuration d'équilibre de stabilité minimale (extrait représentatif). Les volumes des blocs évacués sont figurés par la courbe. Pour chaque événement, le type de mouvement est figuré par un point (D = décollement, F = glissement sur une face, A = glissement sur une arête).

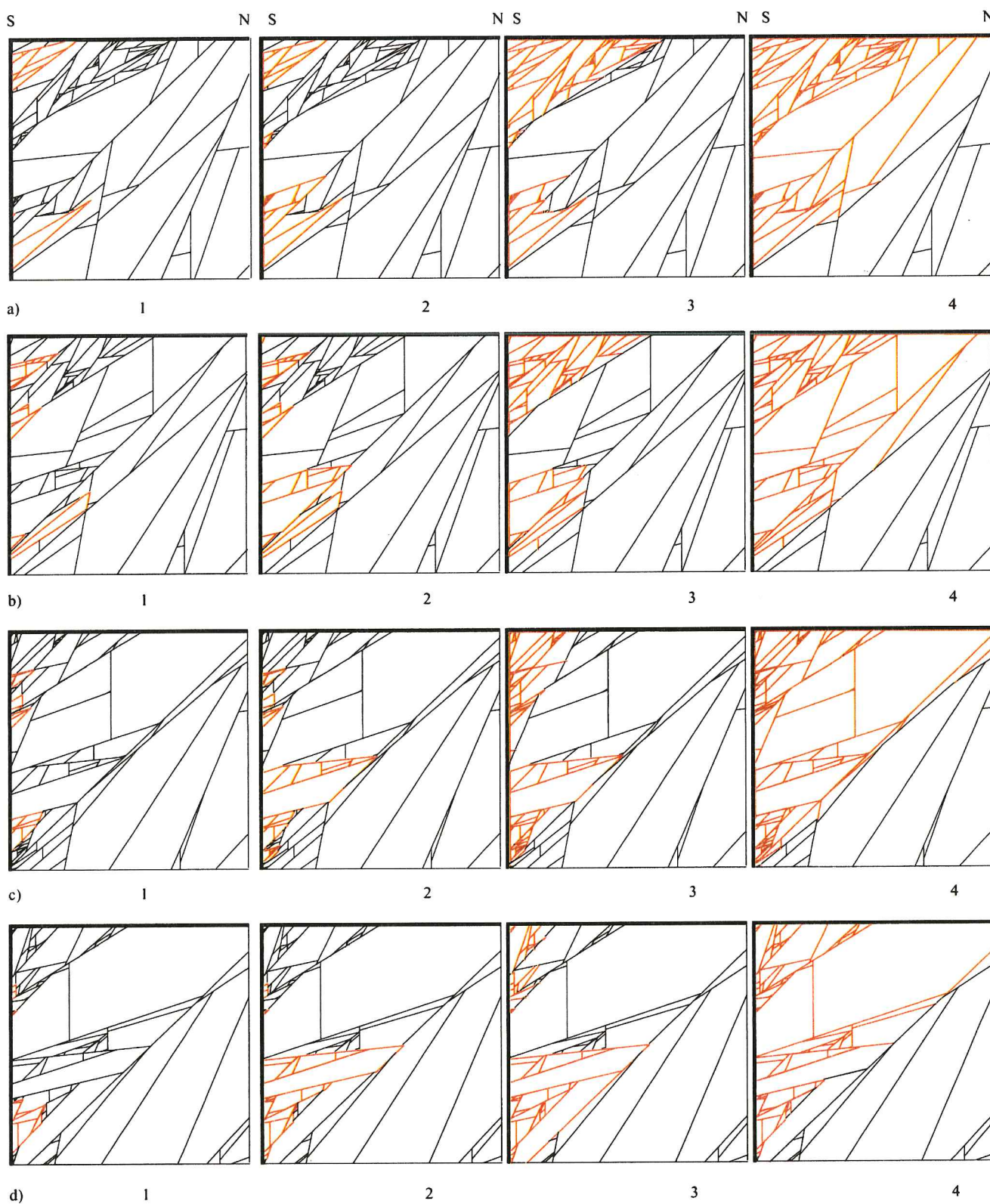


FIG. 195.— Simulation d'éboulement dans un bloc cubique de 50 m d'arête parcouru par 1848 fractures à pendage incliné vers le vide, et dont la face sud et la face supérieure sont à l'air libre (trait gras). La matrice des fractures est donné par la figure 193a. Coupes verticales parallèles N-S pour quatre abscisses du modèle (a), b), c), d) à quatre stades successifs de l'évolution (1 à 4). En rouge, les blocs évacués. Les figures de droite représentent le stade final stable. Angle de friction $\Phi = 25^\circ$.

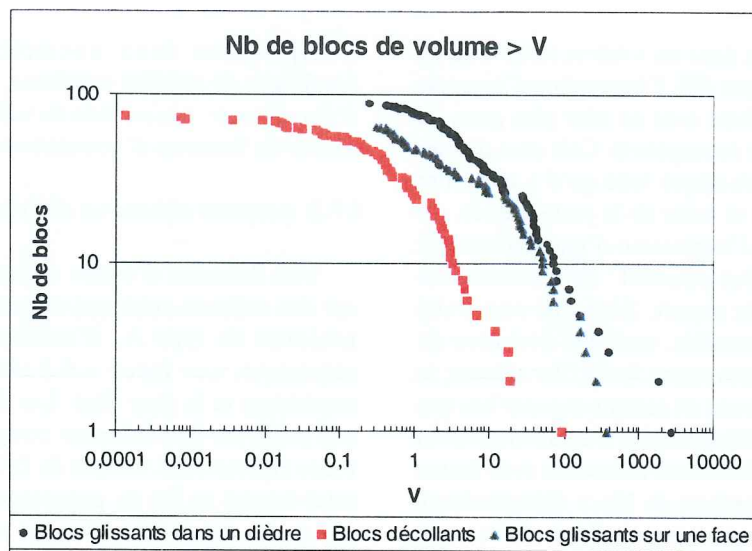


FIG. 196. – Simulation d'éboulement sur un escarpement dans une configuration de stabilité minimale. Distribution cumulée en coordonnées bilogarithmiques des volumes des blocs éboulés selon les trois processus d'évacuation.

Pour une telle configuration de stabilité minimale, nous avons relevé une répartition assez homogène des types de départ des blocs (fig. 194) : les deux types de glissement et le décollement montrent une fréquence similaire.

La figure 195 présente quatre stades du processus de vidange de l'escarpement. L'examen des coupes appelle certaines remarques, qui ont été corroborées par plusieurs autres simulations du même type. L'éboulement est initié par l'éjection de blocs en des points dispersés sur la paroi. On observe qu'il se poursuit, d'une façon générale, pour toutes les simulations dans lesquelles on réalise un découpage de type « A » (tirage aléatoire du bloc à diviser), par la vidange prioritaire des zones de fracturation plus dense. Les blocs situés dans ces zones d'amas de fractures semblent ainsi systématiquement évacués de façon privilégiée (voir par exemple les images a3 et b3 de la figure 195).

Ce résultat est *a priori* paradoxal. En effet, d'après (2.24) et (2.32), la force de glissement est proportionnelle au volume du bloc. Nous devons donc attribuer à cette observation une origine d'ordre géométrique ou topologique. Il est vraisemblable que la notion d'encombrement intervienne : l'éboulement tend à creuser sur la paroi une cavité, dont le volume est très grand par rapport aux petits blocs, ce qui peut favoriser leur évacuation. Au contraire, les gros blocs disposent moins facilement d'un espace de dégagement. Pour tenter de mieux comprendre le comportement des blocs de petite taille dans l'éboulement, il paraît intéressant d'étudier la corrélation entre le type de glissement et le volume des blocs. Nous avons représenté le nombre de blocs de volume supérieur à un volume donné (fig. 196).

Il apparaît que les blocs les plus petits sont libérés prioritairement en décollement ; peu de blocs de grosse taille sortent du système de cette façon. Les blocs de taille intermédiaire (1-50 unités de volume dans la figure) ont tendance à glisser sur deux de leurs faces. Pour des valeurs encore plus importantes du volume (de l'ordre de 100 unités dans notre figure), on observe un lissage du comportement, les deux modes de glissement (plan ou dièdre) devenant plus ou moins équiprobables. La vidange prioritaire observée dans les zones très fracturées pourrait donc être occasionnée par la libération de blocs de plus gros volumes situés immédiatement dessous, comme le schématise en deux dimensions la figure 197.

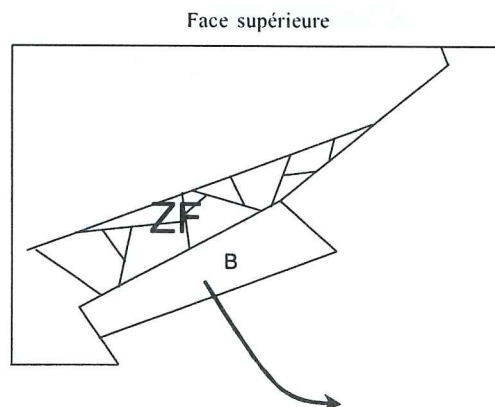


FIG. 197. – Illustration en 2D du mécanisme de vidange des petits blocs. Le départ du bloc B, sous la zone fracturée ZF, provoquera la libération en cascade d'un grand nombre de blocs plus petits par décollement.

Ce comportement existe vraisemblablement aussi dans le milieu naturel. Les conséquences peuvent cependant être différentes de celles observées dans notre

modèle. Par exemple, et dans un schéma inverse de ce qui est décrit dans la figure 197, l'évacuation d'un amas de petits blocs peut se faire sous un bloc plus gros, en creusant ainsi une niche de surplomb. Cela peut donner lieu à une contrainte mécanique telle qu'il y a cassure du gros bloc sus-jacent, et sortie de la partie cassée. Ce processus correspond à l'expression d'une fracture qui existe initialement à l'état potentiel : notre conception intègre parfaitement cet aspect. Bien que non traité actuellement par notre modèle, une telle évolution du moteur est de ce fait relativement facile. Par ailleurs, le moteur EBOUL3D ne prend en compte aujourd'hui que le dégagement de blocs élémentaires. Il serait intéressant de traiter l'évacuation des zones fracturées sous forme de blocs complexes (agrégats de blocs élémentaires). Pour les mêmes raisons qui viennent d'être citées, cette évolution est envisageable.

Après ces deux exemples représentant des conditions de stabilité extrêmes, nous étudierons le cas d'éboulement à la surface de volumes parcourus par un réseau de fractures d'orientations aléatoires.

3.1.2. Attitudes aléatoires des plans de fractures

Une douzaine d'essais d'éboulement a été réalisée sur des volumes cubiques affectés par une fracturation toujours de type A, d'orientation et de pendage aléatoires. Les faces « à l'air libre » sont la face supérieure et la face Sud. Les différentes simulations ont porté sur des volumes composés d'un nombre de blocs élémentaires variant de 2000 à 10000. Le volume total évacué en fin de processus, c'est-à-dire lorsqu'il n'y a plus aucun bloc libre est représenté sur la figure 198, pour 3 essais représentatifs.

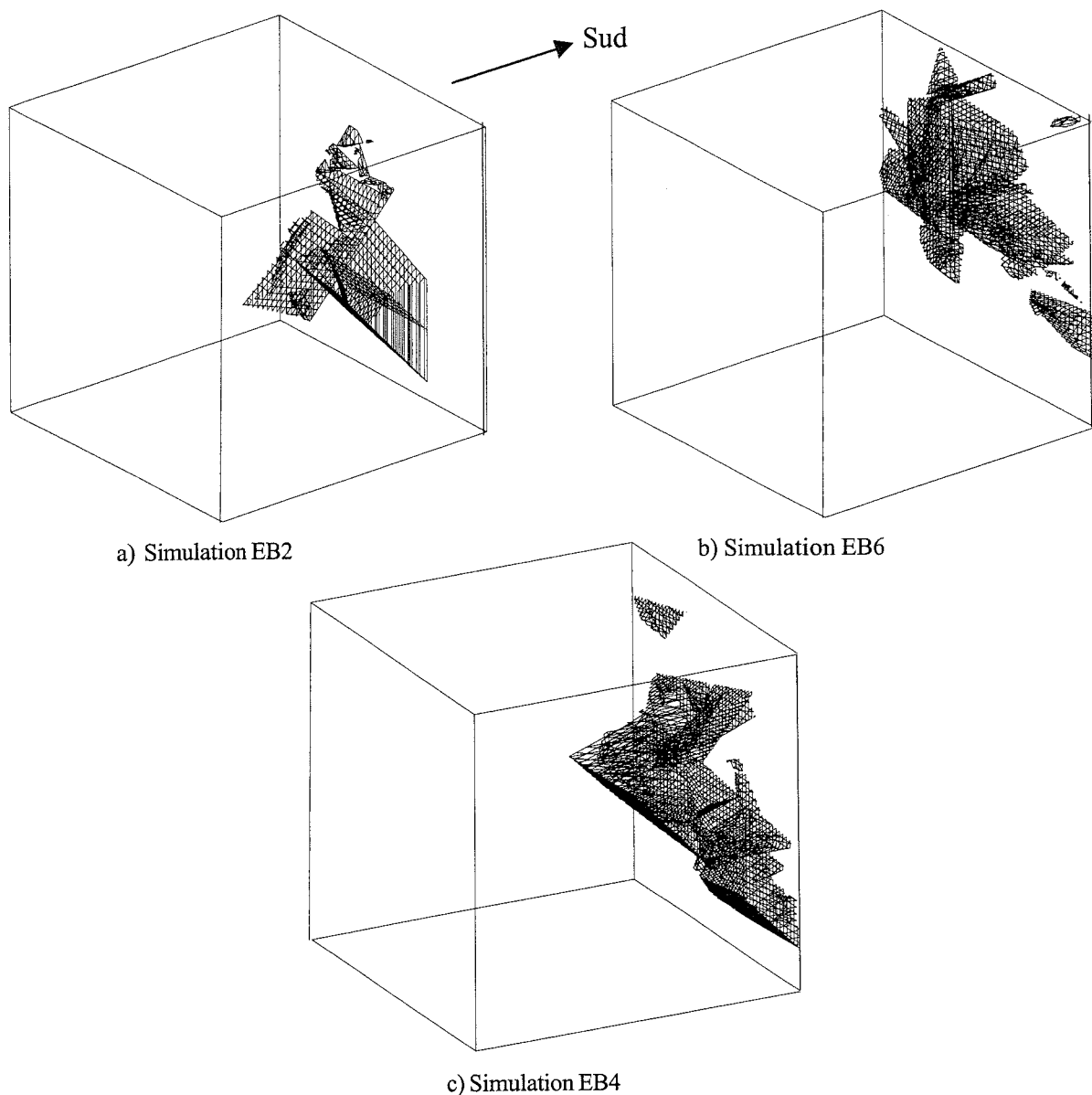


FIG. 198.— Trois exemples d'éboulements sur des volumes cubiques affectés par une fracturation homogène de type « A ». Fractures non recoupantes. a) : Simulation EB2 : 2001 blocs (2000 fractures non recoupantes) – 45 blocs évacués. b) : Simulation EB6 : 5001 blocs (5000 fractures non recoupantes) – 168 blocs évacués. c) : Simulation EB4 : 10001 blocs (10000 fractures non recoupantes) – 80 blocs évacués. La face supérieure et la face de l'éboulement (sud) sont à l'air libre. Les volumes évacués à terme sont représentés en 3D.

Ce volume total apparaît sous la forme d'une dépression plus ou moins marquée dans la paroi, plus rarement de plusieurs dépressions de tailles variables. Il

n'a jamais été observé, dans le cas d'une fracturation aléatoire, d'éboulement provoquant la disparition complète de la face verticale de la paroi.

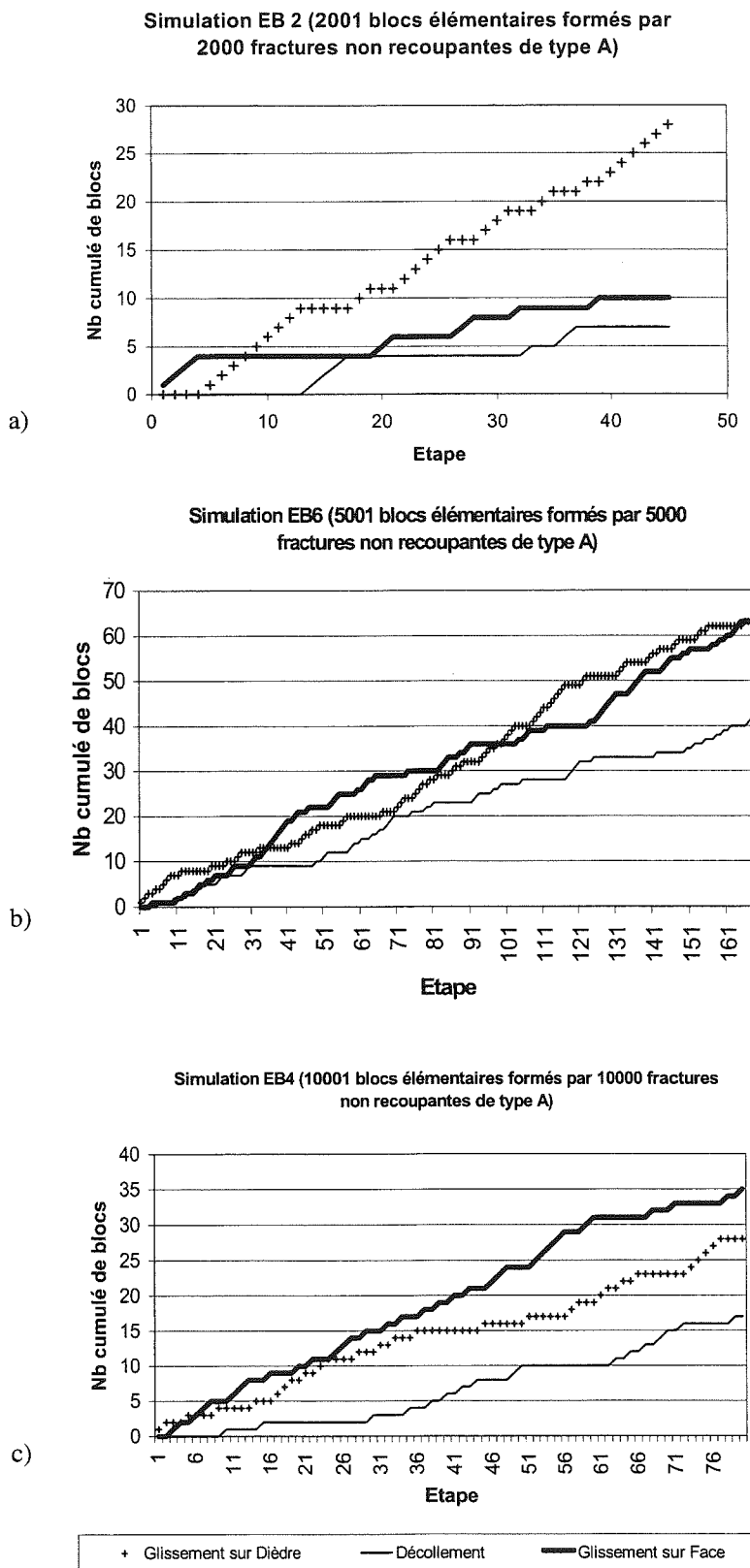


FIG. 199.— Nombres progressifs de blocs libérés dans l'éboulement d'escarpements, dans le cas de fracturation aléatoire non recoupantes de type « A ». Volume initial composé de a) 2001 blocs, b) 5001 blocs, c) 10001 blocs. On relève dans ces trois simulations une prédominance des phénomènes de glissement, au détriment du décollement qui est minoritaire.

Par ailleurs, on note que le plus souvent, les dépressions ne sont pas initiées sur le bord supérieur de la paroi. Il semble donc que cette zone ne constitue pas, du point de vue géométrique une zone de susceptibilité particulière au regard de l'éboulement.

On observe une grande variabilité dans le nombre de blocs évacués (fig. 198 et 199).

Du point de vue du mode de sortie des blocs, le décollement concerne toujours un nombre de blocs moins important que les autres types de sortie de blocs. Ce phénomène de décollement semble, à première vue, alterner de façon régulière avec les autres modes d'évacuation des blocs.

De façon à affiner ces premiers résultats montrant la fréquence moindre du phénomène de décollement, nous avons examiné l'impact du caractère recoupant ou non des fractures, pour les deux processus de découpage A et B. Pour la clarté de l'exposé, nous présentons l'impact du caractère recoupant des fractures uniquement sur des exemples de découpage de type A, le cas B et la comparaison A/B étant traités dans le paragraphe 3.3.

3.2. Effet du caractère recoupant des fractures

En conservant le caractère aléatoire de la fracturation, nous avons réalisé plusieurs simulations dans lesquelles certaines fractures recoupent des

discontinuités préexistantes. Ce nombre de fractures recoupantes, tout comme l'orientation et l'inclinaison des fractures, est aléatoire. Le nombre de blocs recoupés par chaque fracture est également tiré aléatoirement.

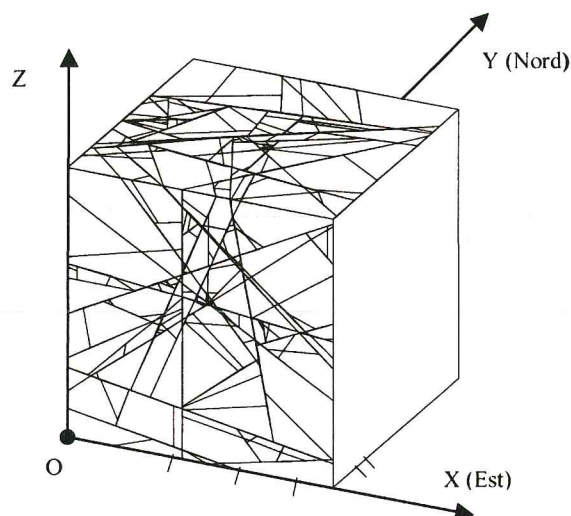


FIG. 200.- Simulation EB8. Cube d'arête 50 unités, 1829 fractures, dont 904 recoupantes. Les traces de fractures sont représentées sur les 2 faces à l'air libre. L'éboulement se produit sur la face verticale normale à OY ($Y=0$). L'emplacement des coupes présentées figure 201 est repéré par des marques le long des axes.

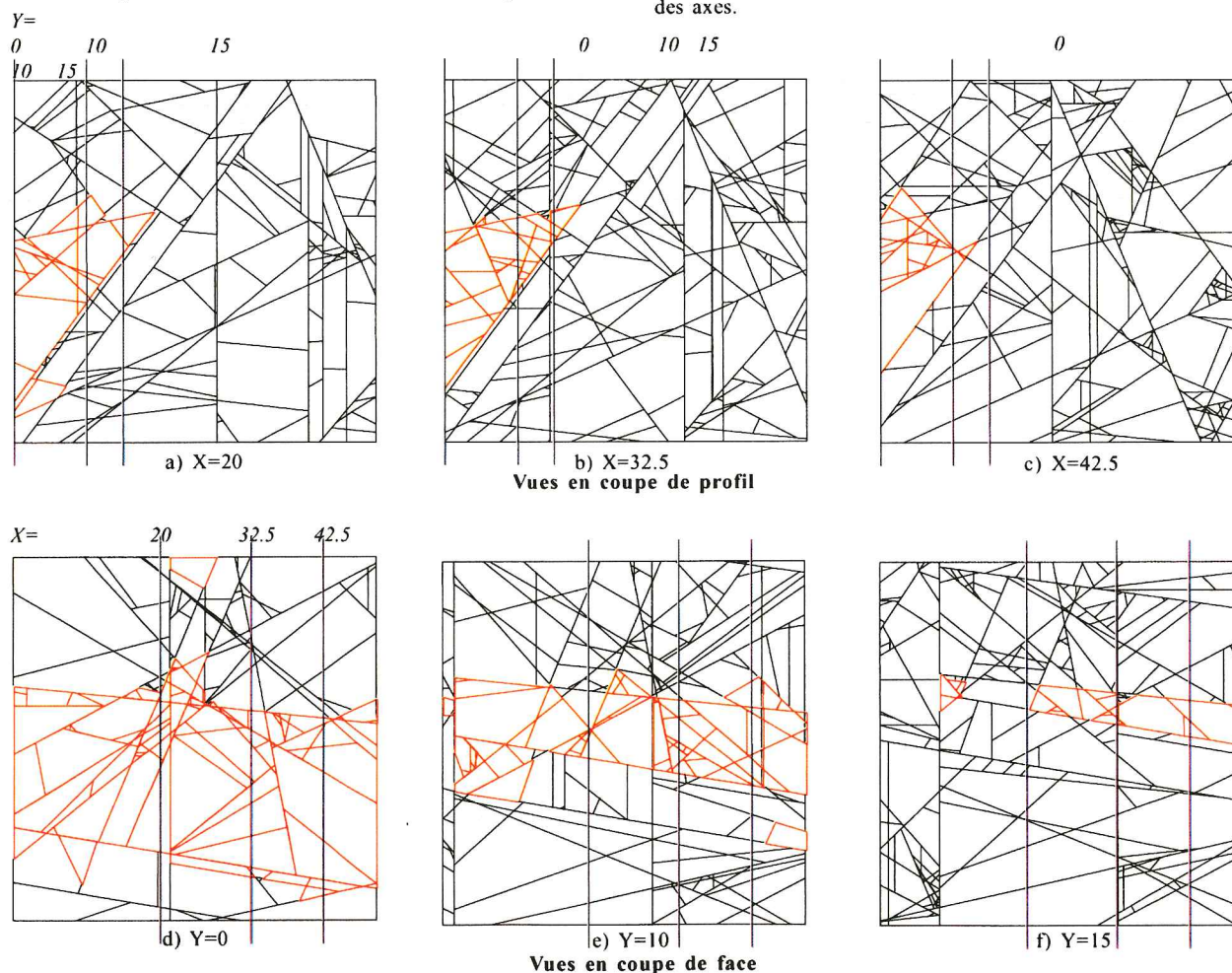
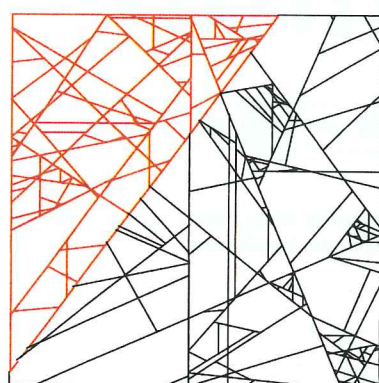


FIG. 201.- Simulation EB8. Coupes verticales à travers le modèle à un stade intermédiaire d'avancement du processus d'éboulement (17% du volume évacué). Les blocs évacués sont en trait clair (rouge). En italique : position des coupes.

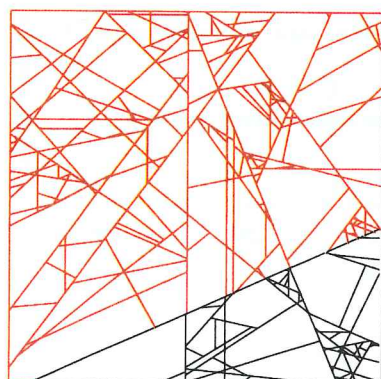
La figure 200 présente un exemple de volume fracturé comportant des fractures recoupantes, et sur lequel sera simulé un éboulement.

On observe dans toutes ces simulations que le processus d'éboulement a tendance à progresser le long des plans de surface importante, correspondant aux plans des fractures recoupantes (fig. 201). La progression est représentée à un stade plus avancé, puis au stade final sur la figure 202.

La fin de l'éboulement se produit après évacuation de 89% du volume total initial des blocs. Il subsiste alors un ensemble de blocs stables, montrant en coupe (fig. 202b) une surface inclinée d'une pente proche de la valeur de l'angle de friction (25°).



a)



b)

FIG. 202.- Simulation EB8. 5000 fractures recoupantes de type B. Évolution du processus d'éboulement a) à un stade avancé (23% du volume évacué) et b) au stade terminal stable (100% du volume évacué, représentant 89% du volume total initial). Angle de friction $\Phi = 25^\circ$. Coupes normales à OX pour $X = 42.5$

Les nombres de blocs et volumes évacués sont, comme cela était prévisible, largement plus élevés lorsqu'il existe des fractures recoupantes dans l'assemblage (fig. 203).

EB6	Mode de sortie	Nb de blocs	% Nb	Volume	% Volume
	A	110	36%	3795	61%
	D	77	25%	427	7%
	F	118	39%	2032	32%
	Total	305	100%	6254	100%

a)

EB8	Mode de sortie	Nb de blocs	% Nb	Volume	% Volume
	A	1244	25%	67168	45%
	D	2520	51%	10409	7%
	F	1168	24%	70571	48%
	Total	4932	100%	148142	100%

b)

FIG. 203.- Nombres de blocs et volumes évacués dans 2 simulations d'éboulements réalisées à partir de volumes cubiques de 5000 blocs. Découpage de type A. a) EB6 = fractures non recoupantes ; b) EB8 = fractures recoupantes.

En considérant le nombre relatif de blocs concerné par chacun des trois mécanisme d'évacuation (fig. 203 et 204), on remarque, de façon assez constante, que les fractures recoupantes favorisent le décollement. Les taux sont en effet inférieurs pour les 2 modes de glissement, ce qui est l'inverse de ce qui a été constaté pour les fractures non recoupantes. L'introduction de fractures recoupantes provoque donc une certaine déstabilisation de blocs, qui partent en décollement.

Lorsqu'on considère les volumes, deux remarques s'imposent. D'une part, le taux de décollement demeure identique en volumes, qu'il existe ou non des fractures recoupantes. Ajoutée à la remarque précédente sur le nombre de blocs, cette observation tend à montrer qu'en contexte recoupant, le décollement touche préférentiellement les petits blocs, et renforce notre constat sur l'« encombrement », par lequel les petits blocs sont géométriquement plus « mobiles » que les gros (cf § 3.1.1.2). D'autre part, les deux modes de glissement tendent à évacuer des volumes semblables si des fractures recoupantes existent. Il est probable que l'existence de plans de fractures de surface plus grande favorise ce phénomène, au détriment du glissement sur dièdre qui lui, a tendance à dominer dans un contexte de fractures non recoupantes. Ce constat prouve que les fractures recoupantes apportent une certaine « homogénéité » géométrique, qui se traduit par une production similaire dans les deux modes de glissement des blocs.

Les diagrammes de la figure 205 montrent deux cas de figure comparés représentatifs d'éboulements en contexte de fractures non recoupantes (fig. 205a) et recoupantes (fig. 205b).

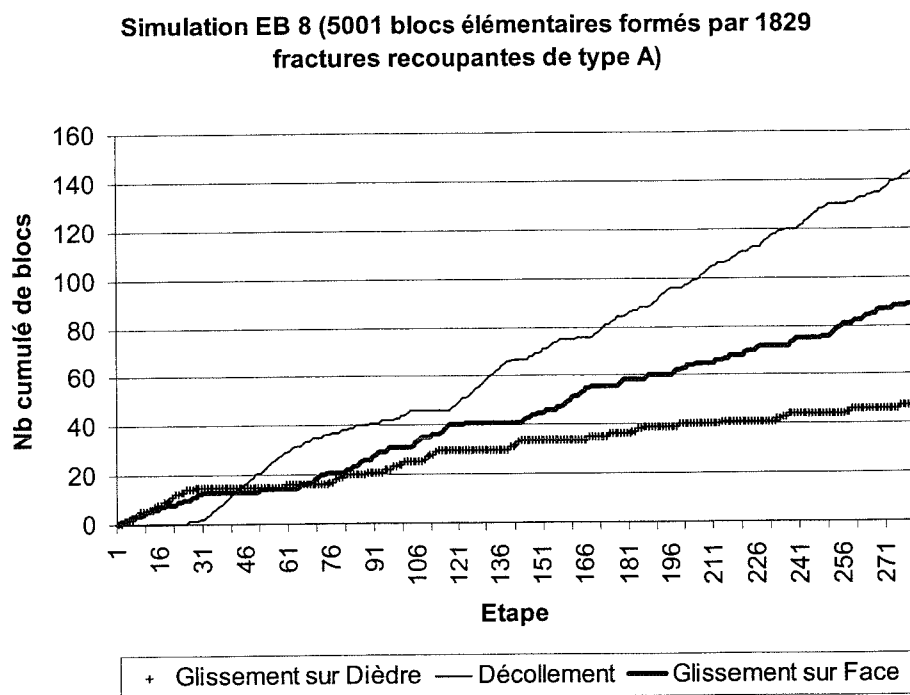


FIG. 204.— Simulation EB8 (5000 blocs, 1829 fractures recoupantes de type B). Nombre de blocs libérés par les 3 mécanismes au cours de l'éboulement au stade d'avancement représenté figure 201. On note l'importance du décollement.

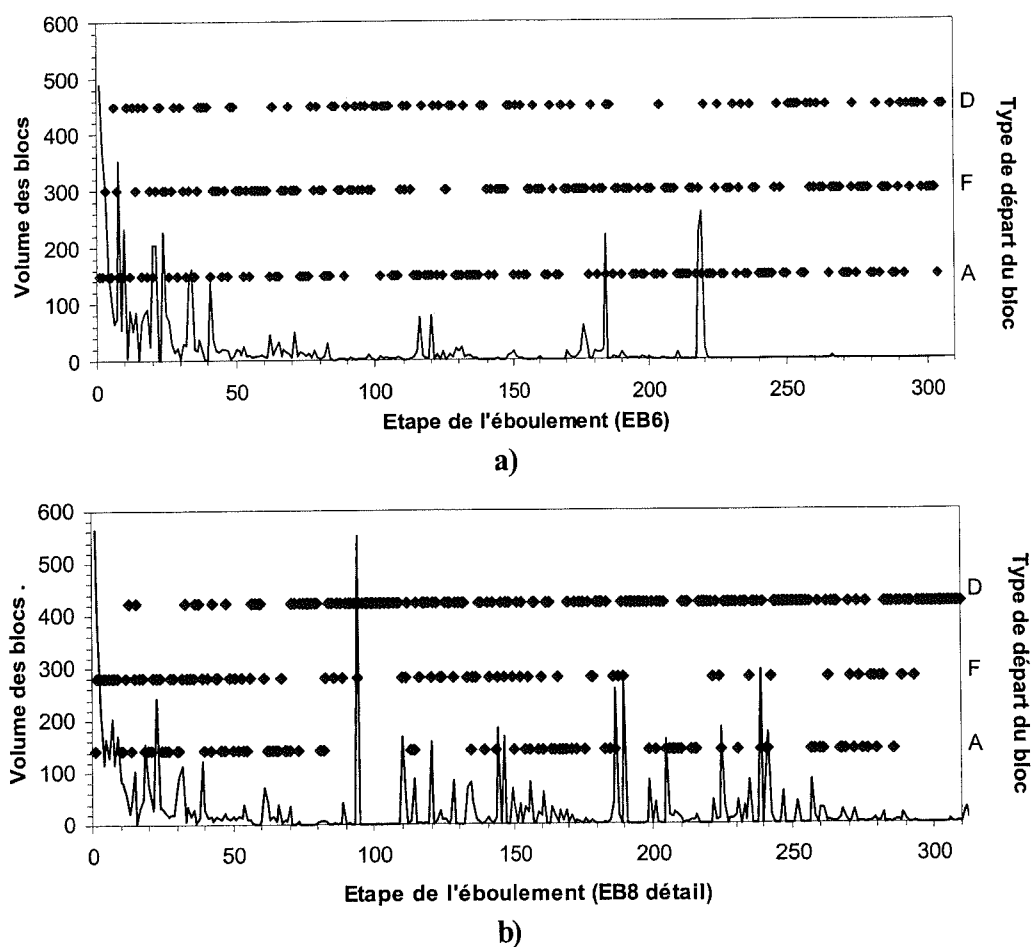


FIG. 205.— Diagramme de 2 séquences d'éboulements sur un volume cubique de 5000 blocs. Type de découpage A. Fractures a) non recoupantes et b) recoupantes. Les volumes des blocs évacués sont figurés par une courbe. En abscisses, chaque étape correspond au départ d'un bloc unique. Chaque départ de bloc est figuré par un point (D = décollement, F = glissement sur une face, A = glissement sur une arête).

Chaque pic représenté sur ces figures correspond à l'évacuation d'un bloc. D'une façon générale, les simulations montrent qu'en l'absence de recoupement, une évacuation intense de blocs se produit dans une première phase de l'éboulement. Le phénomène disparaît par la suite, comme le montre la raréfaction des pics (fig. 205a) et l'adoucissement de la courbe (fig. 206a). Lorsque des fractures recoupantes existent, cette « purge » initiale est moins marquée. Le rythme d'évacuation persiste alors beaucoup plus longtemps (fig. 205b et 206b). Par ailleurs, on remarque dans ce dernier cas la présence de nombreux amas représentant des départs de blocs en décollement (fig. 205b, ligne D). Ces amas représentent des salves de blocs quittant l'escarpement en avalanches.

Nous avons confronté, pour l'éboulement EB8, 1) la décomposition en phases d'avalanches de la figure 206b, 2) les pics instantanés de la figure 207, et 3) le détail bloc par bloc de la séquence de l'éboulement. Ceci permet d'éclaircir la relation entre l'évacuation de blocs de gros volume d'une part, et la naissance d'une avalanche d'autre part. On peut ainsi constater que :

- pour les pics 1, 2 et 5, la disparition d'un gros bloc engendre une série d'évacuations, surtout en décollement. Ce résultat est particulièrement visible pour le pic n°5, qui initie véritablement une avalanche;
- pour les pics 3, 4 et 6, c'est l'inverse : une avalanche en cours entraîne dans sa chute un gros bloc. Dans le cas du pic n°6 (fig. 207), la chute du gros bloc intervient comme point final à l'avalanche.

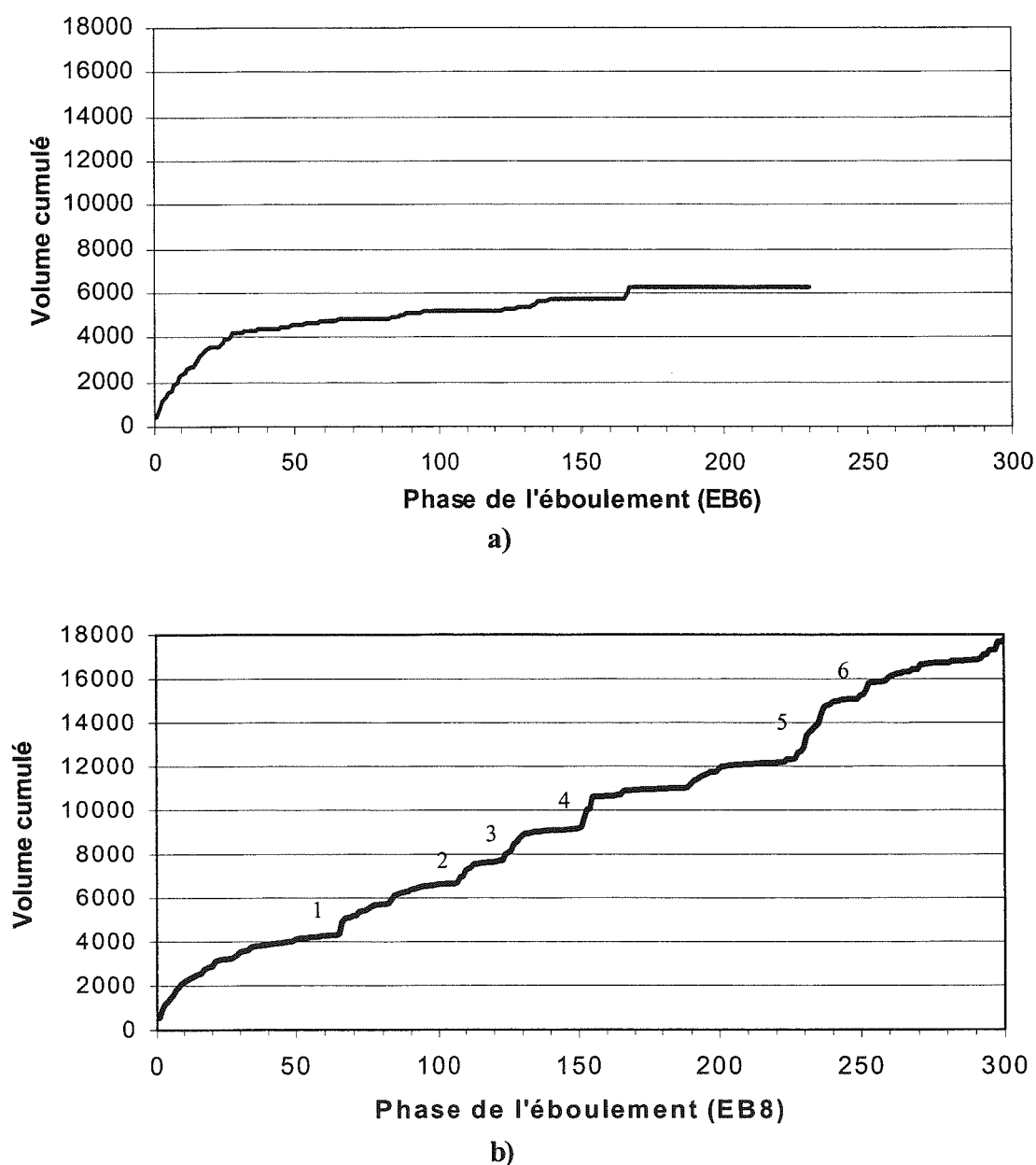


FIG. 206.- Volumes évacués au cours d'éboulements. Type de découpage A, 5000 blocs. a) Aucune fractures recoupantes, b) 904 fractures recoupantes. En abscisses, chaque phase correspond à l'évacuation d'un bloc glissant, suivi éventuellement d'une avalanche de blocs décollants. Les avalanches sont numérotées sur la figure.

La relation entre évacuation d'un gros volume et avalanche est donc à double sens. Ceci signifie que le départ d'un bloc de volume particulièrement important est une condition suffisante, mais non nécessaire, au déclenchement d'une avalanche.

3.3. Rôle du type de découpage

La distribution volumique des blocs doit avoir un impact dans le phénomène d'éboulement. Sans examiner de façon complète cette hypothèse, nous

avons limité l'étude à deux de nos processus de fragmentation des blocs : le type « A » dans lequel le bloc à diviser est tiré aléatoirement, et le type « B », dans lequel le germe de la fracture est un point tiré aléatoirement dans l'espace, préalablement à la division d'un bloc englobant ce point. Le type A a fait l'objet d'étude dans les paragraphes précédents. Nous montrons ici, par différence, les caractéristiques d'éboulements dans des assemblages de type B, d'abord en mode recoupant, puis en mode non recoupant.

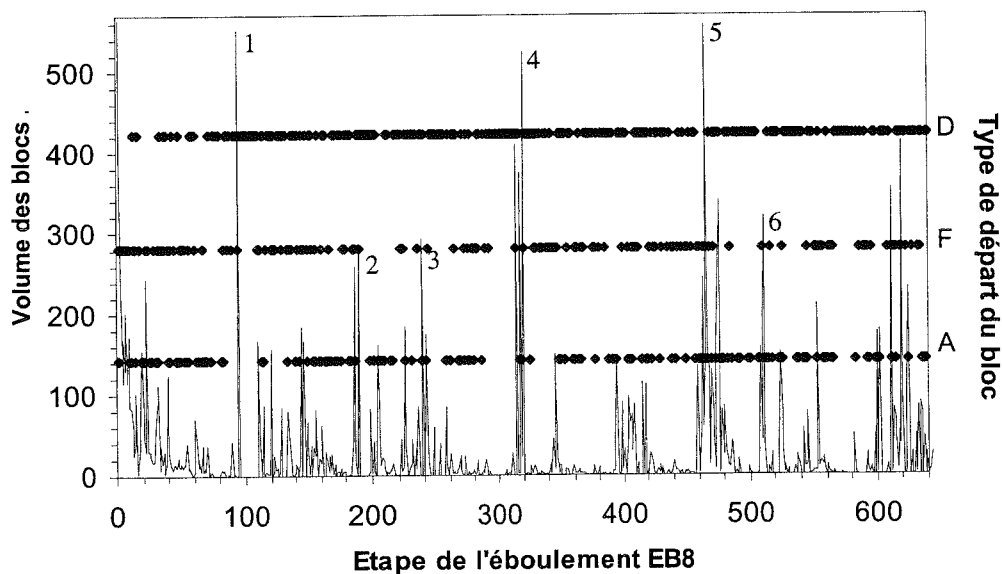


FIG. 207.— Diagramme de l'éboulement EB8 (5000 blocs, type de découpage A, fractures recoupantes). Les volumes des blocs évacués sont figurés par une courbe. En abscisses, chaque étape correspond au départ d'un bloc unique. Chaque départ de bloc est figuré par un point (D = décollement, F = glissement sur une face, A = glissement sur une arête). Les avalanches correspondant aux pics numérotés sont repérés sur la figure 206b.

Simulation EB 7 (5000 fractures non recoupantes, type B)

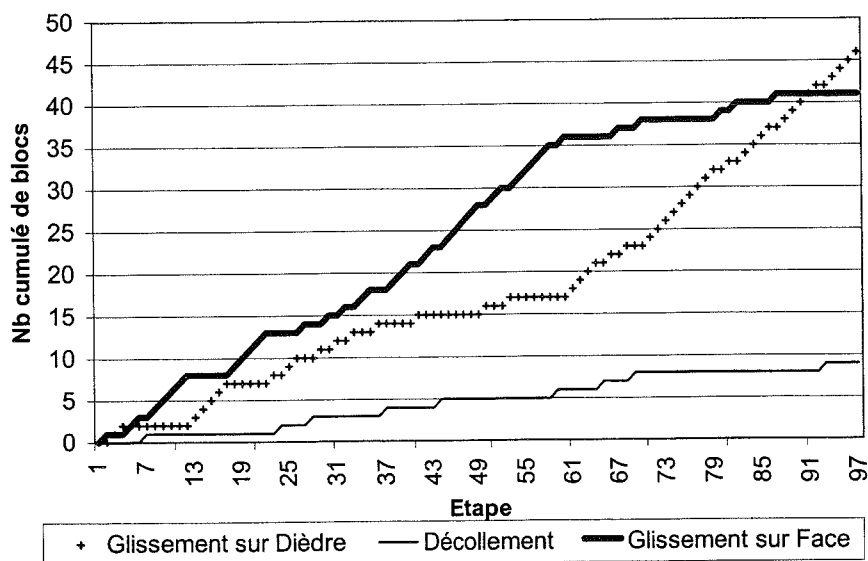


FIG. 208.— Simulation EB7 (fractures non recoupantes de type B). Nombre de blocs libérés par les 3 mécanismes au cours de l'éboulement. Le décollement est minoritaire en nombre de blocs. Les deux autres modes présentent des proportions variables, comme le montre l'inversion d'importance relative vers l'étape 92.

Dans un découpage de type B, et lorsqu'on n'a pas de fractures recoupantes dans l'assemblage, le décollement est, davantage encore que dans le processus A, un processus minoritaire en termes de nombre relatif de blocs évacués (fig. 208).

EB7

Mode de sortie	Nb de blocs	% Nb	Volume	% Volume
A	68	44%	1522	46%
D	15	10%	216	7%
F	71	46%	1572	47%
Total	154	100%	3310	100%

FIG. 209. – Nombres de blocs et volumes des blocs évacués dans une simulation d'éboulement réalisée dans un découpages de type B : 5000 blocs, fractures non recoupantes.

La proportion relative des volumes évacués dans les 3 modes est sensiblement la même pour le découpage B que pour le découpage A (fig. 209) (l'exception des fractures non recoupantes de type A a été discutée plus haut).

La figure 210a montre le nombre faible de décollements. Parallèlement, la courbe très régulière des volumes cumulés révèle l'absence quasiment totale d'avalanches (fig. 210b).

Par contre, en introduisant dans le modèle des fractures recoupantes, on constate que la proportion des volumes évacués dans les 3 modes est quasiment équilibrée (fig. 211).

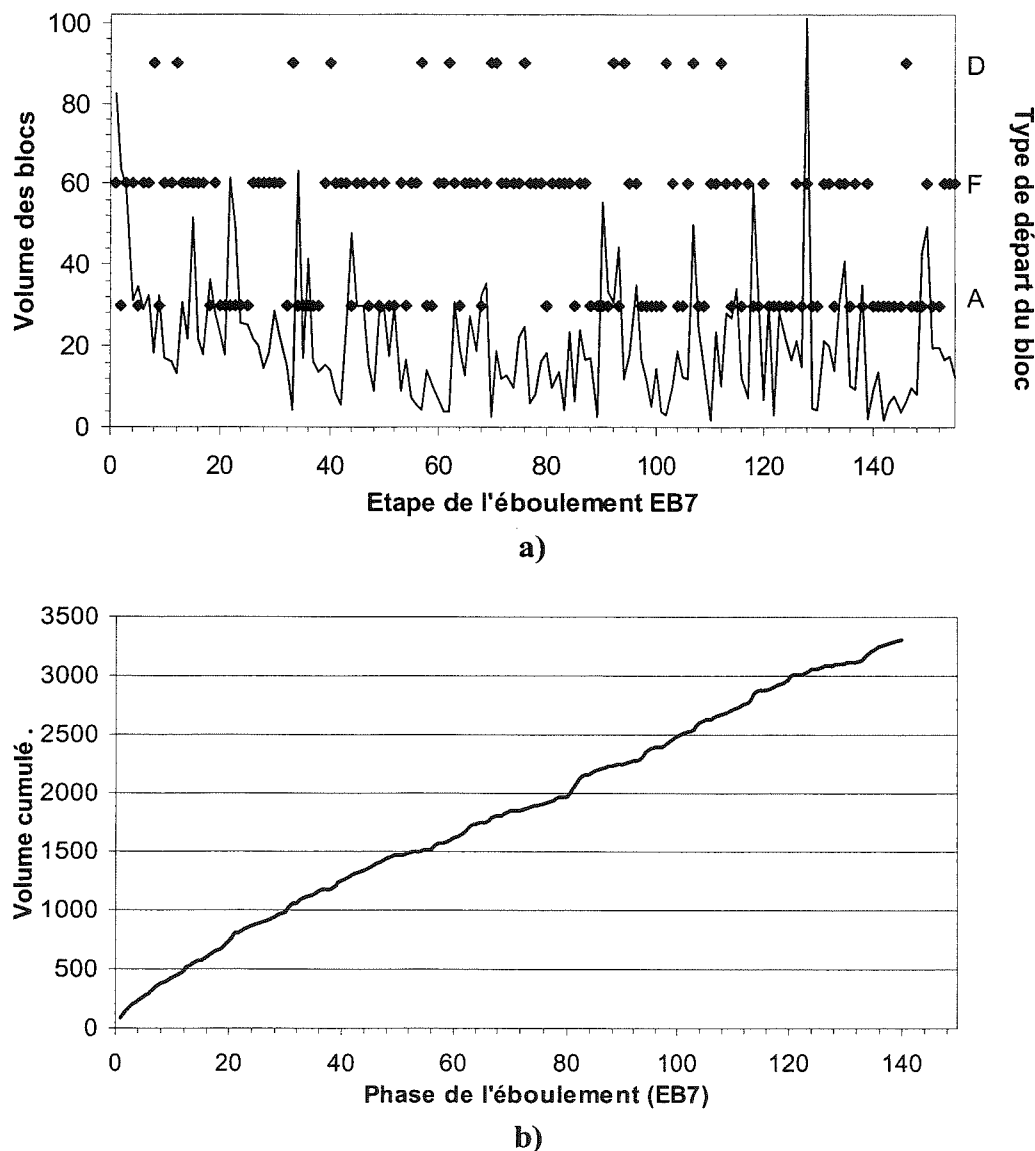


FIG. 210. – Éboulement EB7 : découpage de type B, 5000 fractures non recoupantes. a) Diagramme séquentiel. Les volumes des blocs évacués sont figurés par une ligne. Pour chaque événement, le type de départ est figuré par un point (D=décollement, F=glissement sur une face, A=glissement sur une arête). Chaque étape représente le départ d'un bloc. Le décollement est rare. b) Volumes cumulés évacués. Chaque phase représente le départ d'un bloc, suivi éventuellement d'une avalanche de blocs décollants. Une phase correspond donc à une ou plusieurs étapes. La courbe est quasiment linéaire, montrant l'absence d'avalanche.

EB9

Mode de sortie	Nombre de blocs	% Nombre	Volume	% Volume
A	150	37%	7410	49%
D	132	33%	1149	8%
F	120	30%	6414	43%
Total	402	100%	14973	100%

FIG. 211.— Nombres de blocs et volumes des blocs évacués dans une simulation d'éboulement réalisée dans un découpage de type B : 2572 blocs, 78 fractures dont 65 recoupantes.

Par ailleurs, en termes de nombre de blocs, le décollement atteint la proportion des deux autres modes (fig. 211, 212 et 213a). En revanche, ce phénomène ne devient pas majoritaire comme dans le processus A. Cette remarque tend à montrer qu'un assemblage sera d'autant moins favorable à la naissance d'avalanches que les blocs sont de taille comparable. Le découpage de type B paraît donc propice à une certaine stabilité géométrique au regard du phénomène de décollement.

Le diagramme des volumes cumulés (fig. 213b) fait apparaître des ruptures de pente importantes. Cependant, un examen détaillé montre que l'évacuation soudaine de volumes importants ne peut pas dans ce cas être reliée à des salves de décollement. Les ressauts de la courbe des volumes cumulés correspondent en fait à l'évacuation plus ou moins ponctuelle de quelques blocs isolés (pics 1, 2 et 3) ou d'un plus grand nombre de blocs (pics 4 et 5), sans que le mécanisme de décollement en soit l'origine. Par exemple, le pic 4 représente une véritable avalanche de blocs glissant sur des dièdres, tandis que le pic 5 est une avalanche de blocs glissant sur un plan. Ce type de phénomène peut être responsable, en l'absence même de décollement, de la production de volumes importants (ressaut 5, fig. 213b).

3.4. Conclusion

Nous avons développé, sur les bases de la théorie des blocs (Goodman et Shi, 1985), le code de calcul EBOUL3D. Ce programme utilise les éléments structuraux descriptifs produits par le modèle OBSIFRAC. Il a permis de simuler, dans une optique purement géométrique, et à l'aide d'une représentation volontairement très simplifiée de la friction, des séquences d'évacuation de blocs lors de l'éboulement d'un escarpement vertical. Des essais ont été réalisés à partir de volumes découpés par des fractures d'orientations variables, recoupantes et non recoupantes, générées dans les processus de fragmentation A et B, décrits par ailleurs dans notre Seconde Partie.

Nous avons validé notre modèle par des essais sur deux agencements géométriques correspondant à une stabilité maximale et à une stabilité minimale des blocs, suivant l'inclinaison des fractures, respectivement vers l'intérieur du massif et vers la vallée.

Au-delà de ces cas extrêmes, un agencement aléatoire de l'orientation des fractures a été étudié. Il a été possible de caractériser, à l'aide de paramètres simples, le volume produit et le type de production de blocs dans chacun des cas étudiés. Cette caractérisation permet d'établir un classement des configurations selon le degré de stabilité qu'elles présentent au regard de l'aléa.

Les systèmes de blocs les plus stables sont ceux qui, dans un contexte de fractures non recoupantes, présentent la distribution de volumes la plus homogène. En l'occurrence, c'est la distribution lognormale du processus de découpage B qui montre la stabilité la plus grande. Cet agencement est enclin à produire des volumes de blocs faibles et assez constants. A l'opposé, dans les distributions volumiques hétérogènes, comme celle que présente le type de découpage A, la production de blocs est très variable au cours de l'éboulement, et se

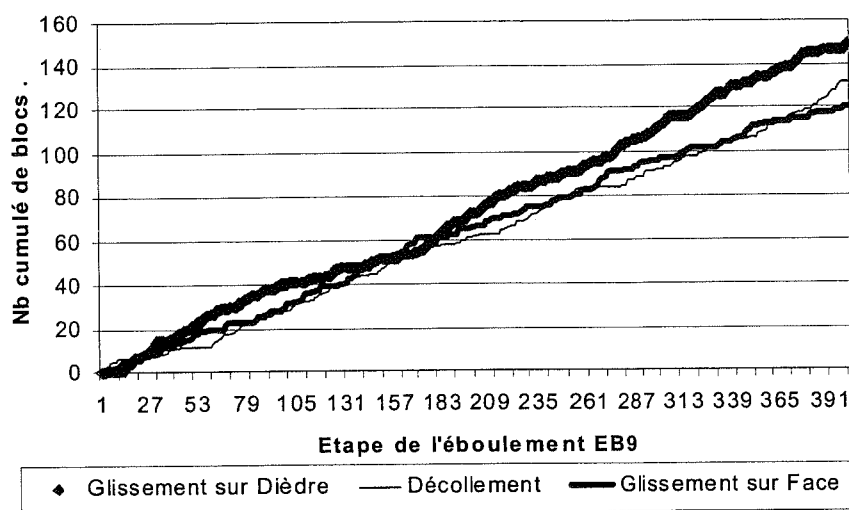


FIG. 212.— Simulation EB9 : 2572 blocs, 78 fractures de type B dont 65 recoupantes. Nombre de blocs libérés par les 3 mécanismes au cours de l'éboulement.

fait sous forme de salves très denses dans des avalanches, phénomène que nous définissons comme l'enchaînement automatique de chutes de blocs.

Nous avons montré que ces avalanches augmentent en volume et en fréquence lorsque les assemblages comportent des fractures recoupantes. Cependant, le phénomène n'a pas dans tous les cas la même origine. Dans un découpage de type A, c'est le phénomène de décollement qui, en touchant sélectivement les petits blocs, déstabilise les blocs environnants. En revanche, dans un découpage de type B, l'homogénéité des volumes rend moins probable le mécanisme de décollement. C'est alors le glissement qui donne naissance à des avalanches de grande ampleur.

D'un point de vue descriptif, nous avons pu mettre en évidence plusieurs aspects de la stabilité d'un talus rocheux. Notamment, nous avons pu vérifier que le bord d'un escarpement vertical n'est pas, sur le plan

géométrique, une zone spécialement fragile au regard de l'éboulement. Nous avons constaté l'utilisation préférentielle des plans de fractures recoupantes dans le glissement.

Le modèle OBSIFRAC est donc apte à représenter en 3 dimensions une configuration structurale déterminée d'un escarpement, à partir de données qui peuvent être mixtes : données statistiques issues d'une connaissance locale de la fracturation, et données discrètes (photographies ou de levés de terrain par exemple). Au-delà de l'agencement structural, OBSIFRAC peut aisément être adapté pour représenter le modelé topographique de l'escarpement. A partir de cette base d'informations tridimensionnelles, notre code de calcul EBOUL3D peut être exploité pour étudier le mode de démantèlement de l'escarpement. Son moteur peut facilement être enrichi de paramètres géomécaniques plus sophistiqués concernant les surfaces de glissement.

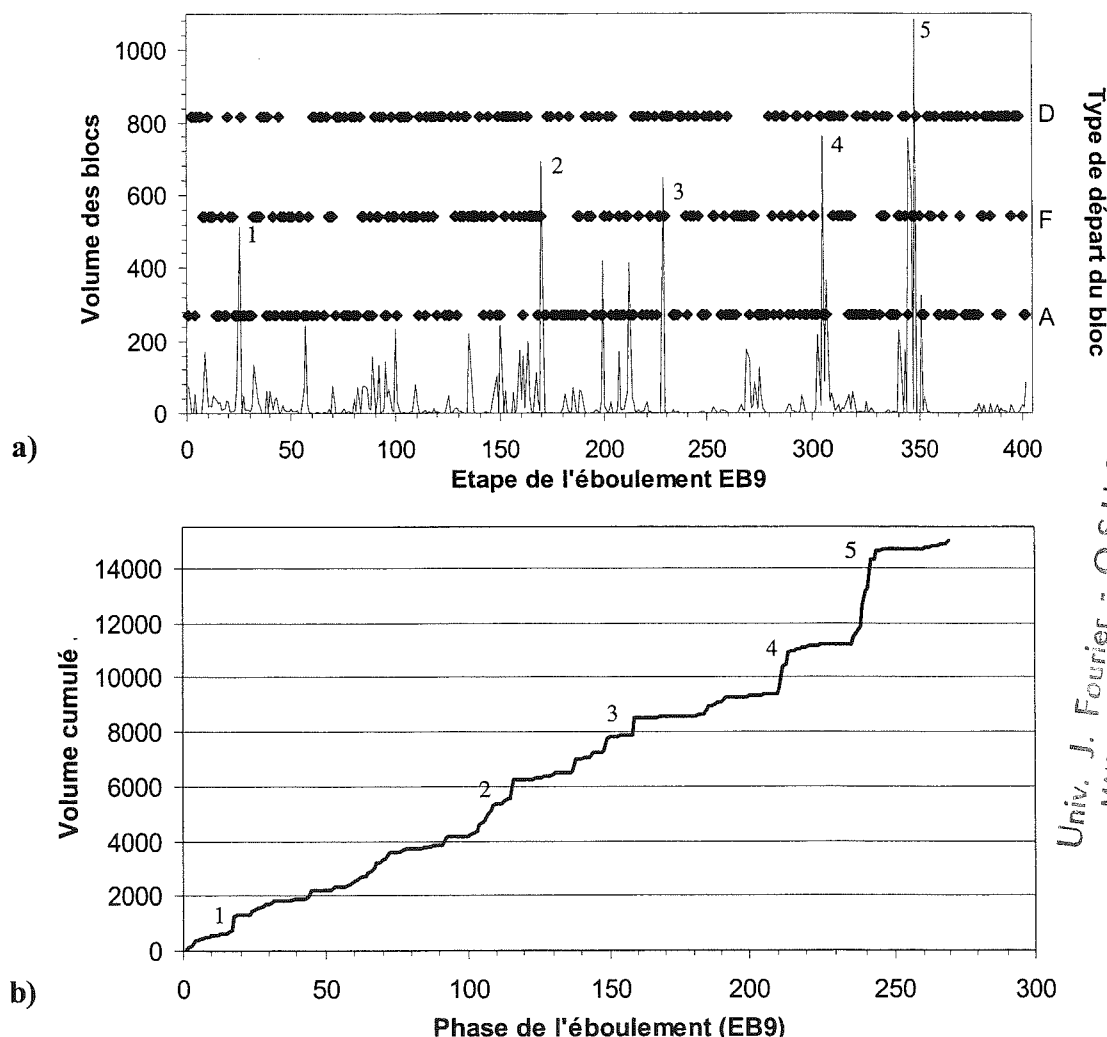


FIG. 213.- Eboulement EB9 : découpage de type B, 2572 blocs, 78 fractures dont 65 recoupantes. a) Diagramme séquentiel. Les volumes des blocs évacués sont figurés par une ligne. Pour chaque événement, le type de départ est figuré par un point (D = décollement, F = glissement sur une face, A = glissement sur une arête). Chaque étape représente le départ d'un bloc. b) Volumes évacués cumulés. Chaque phase représente le départ d'un bloc, suivi éventuellement d'une avalanche de blocs décollants. Une phase correspond donc à une ou plusieurs étapes. Les pics numérotés sur la figure b ne coïncident pas avec des phénomènes décollants, mais sont plutôt liés aux 2 autres modes.

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

La reconstruction, par le géologue structuraliste, du milieu fracturé tridimensionnel est généralement basée sur l'observation d'extraits, en une ou deux dimensions. Cette lacune géométrique dans l'observation de terrain est un handicap pour la compréhension des lois de comportement, complexes, du milieu rocheux. Face à cette difficulté, la complexité naturelle, inextricable dans sa globalité, est généralement décomposée en une somme de problèmes plus simples, lesquels font individuellement l'objet de modélisations. Des modèles numériques ont ainsi été construits pour des applications spécifiques en abordant isolément un aspect particulier, mécanique, hydraulique, ou thermique du réseau de fractures.

Derrière tous ces modèles numériques existe un problème d'ordre fondamental : la conformation géométrique du système de fractures. La disposition spatiale des fractures conditionne en effet un grand nombre de propriétés physiques du massif rocheux. Une meilleure connaissance de l'agencement tridimensionnel et multiscalaire des discontinuités nous est donc apparu comme le préalable indispensable à l'élaboration de modèles spécialisés. C'est donc cet aspect essentiel que nous avons envisagé dans notre travail.

Aborder une qualification géométrique des réseaux fracturés commence par leur observation. Nous avons suggéré, sur la base de sections naturelles, que le réseau de fracture puisse être, en première approximation décrit par un découpage tridimensionnel de fractures planes, interconnectées. L'hypothèse de planéité des fractures est souvent justifiée à l'échelle macroscopique. Nous admettons que cette hypothèse reste vraie d'un point de vue microscopique, même si elle entraîne alors une simplification importante. Si des discontinuités « libres », c'est-à-dire non reliées à d'autres fractures existent, il nous est apparu que ce type de terminaison doit être considéré comme mécaniquement instable, et donc transitoire, devant évoluer irréversiblement vers la connexion. Une telle vision est celle d'un milieu où seule une déformation cassante peut se produire et où toute déformation élastique a été relâchée.

Cette vision tridimensionnelle nouvelle du réseau nous a donc conduit à envisager raisonnablement le massif rocheux non pas comme un milieu parcouru de fractures, mais comme un assemblage de blocs limités par des discontinuités. C'est dans cette perspective que nous avons réalisé notre modèle de blocs OBSIFRAC.

Ce modèle a pour cela intégré dans une base de données relationnelle l'ensemble des éléments

permettant la description géométrique complète d'un assemblage de blocs répondant aux conditions décrites ci-dessus.

Nous avons montré que ce modèle statique descriptif était apte à supporter différentes hypothèses concernant le mode de fragmentation d'un massif rocheux. Quatre scénarios dynamiques de fragmentation, désignés par les lettres A à D et décrits dans la deuxième partie de notre travail, ont ainsi été conçus pour répondre à deux objectifs, dont le point commun est la recherche d'un lien de cause à effet entre les processus et les distributions qu'ils engendrent.

Le premier de nos objectifs posait la question de la relation entre processus fractal et loi puissance. Nous avons en effet noté dans la première partie l'importance et la large répartition dans la nature de propriétés fractales concernant les systèmes de fractures. Notamment ces lois apparaissent clairement dans l'analyse des processus de fragmentation naturels. Dans cette optique, notre modèle nous a permis de reproduire un processus théorique de nature fractale (division de blocs en salves sans remise), nommé processus C, dérivé de celui de la fragmentation du cube d'Allegre [1982], et d'en observer les effets sur les distributions des volumes et des longueurs de traces. Le processus C engendre des distributions de volumes montrant des lois puissances, dont l'exposant a été directement relié à la probabilité de fragmentation du processus. Un jeu de simulations nous a ainsi fourni une validation du modèle. En revanche, il n'a pas été observé de loi puissance sur les distributions de longueurs de traces issues du processus C, en raison de la sous-représentation des petites longueurs dans nos sections.

Dans le prolongement de ce processus C, il nous a paru intéressant d'évaluer dans quelle mesure l'introduction d'une composante stochastique, avec la remise en jeu des blocs divisés, pouvait modifier les distributions résultantes. Le processus D que nous avons imaginé et testé répond à cette attente. Les distributions correspondantes ne montrent plus aucune loi puissance, et répondent à des lois lognormales.

Cependant, l'extrême anisotropie engendrée dans ces cas C et D, aussi bien que l'examen détaillé de la position des découpes obtenues par ces processus, nous conduisent à considérer comme minime, par manque de vraisemblance, leur probabilité d'existence dans le milieu naturel.

Le second objectif que nous nous étions donné procède d'une démarche inverse du premier. En partant de mécanismes de fragmentation supposés existants *in situ* ou, tout au moins, vraisemblables, nous avons examiné quelles sont les distributions résultantes, et en particulier, dans quelles conditions des propriétés fractales peuvent ou ne peuvent pas apparaître à partir d'un mécanisme stochastique. Ainsi, Dans le cas du scénario de découpage B, probable pour des réseaux isotropes, la rupture se produit en un *point* quelconque de l'assemblage. Le processus est purement aléatoire ; il tend à constituer des blocs de même volume. Les distributions correspondantes sont lognormales ; les traces de fractures tendent à remplir le plan entier. Par contre, dans le cas du processus A, qui lui, rend compte des réseaux à forte anisotropie de volumes, la rupture affecte un *bloc* aléatoire du système. Le moteur génère donc dans ce cas des blocs de plus en plus petits. Dans le cas général où aucune distance minimale entre fractures n'est imposée, le processus A engendre des distributions, aussi bien pour les volumes que pour les longueurs des traces, qui suivent une distribution de Weibull. En revanche, dès que l'on donne une valeur non nulle à ce paramètre, nous avons constaté que des distributions en loi puissance apparaissaient, révélant une fractalité dont la dimension brute est de 2,2 à 2,7 pour les volumes et de 1,7 à 1,8 pour les longueurs.

Nous avons donc montré que, dans un processus de fracturation fortement probable dans le milieu naturel, impliquant un tirage aléatoire du bloc à fragmenter, la création de fractures à une distance minimale les unes des autres provoque l'apparition de distributions fractales. Cette condition de naissance de la fractalité dans notre modèle correspond au phénomène naturel d'écrantage. Nous suggérons que le phénomène mécanique à l'origine de l'existence d'une zone d'écrantage autour des fractures naturelles est un facteur majeur dans l'apparition de lois puissance et de la fractalité dans la fracturation.

Après une exploration théorique, nous avons détaillé, dans notre Troisième Partie, deux exemples d'applications concrètes.

La première a démontré l'aptitude du modèle à prendre en compte les observations de terrain. Les données de fracturation provenant de sondages carottés dans le granite du site géothermique de Soultz-sous-Forêts ont fourni à notre moteur de fracturation une loi de distribution statistique des orientations. Par ailleurs, la position absolue des fractures relevées dans les puits entre -1850 et -1900m a imposé une contrainte supplémentaire. L'objectif visé était ici de créer, dans une zone entourant le forage, un réseau fracturé, compatible avec les observations du puits et qui réponde à la distribution statistique d'orientations locales. Cet objectif a été atteint.

Une extrapolation tridimensionnelle réaliste a donc été obtenue à partir de données monodimensionnelles, dans une portion limitée de l'espace rocheux.

Nous avons montré qu'une alternance de ces deux processus de construction A et B était cependant nécessaire pour produire cette extrapolation tout en respectant la position des fractures dans le puits.

Ce résultat nous a amené à deux conclusions. D'une part, les deux types de phénomènes sont vraisemblablement impliqués dans la fracturation du granite de Soultz-sous-Forêts. Nous avons suggéré que le processus B pourrait ainsi correspondre à une fracturation plutôt lente, pénétrante, tendant à affecter la masse du volume rocheux pour y produire des blocs de volumes semblables. Le refroidissement du massif granitique est un phénomène susceptible de répondre à ces critères. Le mécanisme A peut au contraire être rapproché de phénomènes de fracturation plutôt rapides (mouvements extensifs par exemple), dans lesquels les contraintes s'expriment en priorité sur les zones fragilisées par la densité de leur fracturation, donc sur les petits blocs.

D'autre part, la complexité de la nécessaire alternance de ces deux mécanismes montre que la reproduction d'une séquence monodimensionnelle par notre modèle exige une information tridimensionnelle. La signification des proportions respectives des deux processus, et du rythme de l'alternance pourrait être recherchée à la lumière des données génétiques connues.

Par ailleurs et d'un point de vue pratique, notre modèle a montré le nombre très important de fractures nécessaires à une description exhaustive de la réalité. Il est à même de fournir une évaluation des surfaces de l'échangeur géothermique que constitue le réseau fracturé.

Dans un second exemple d'application, nous avons tenté d'examiner la stabilité géométrique d'un escarpement rocheux. Sur un exemple théorique comportant des parois verticales, et avec quelques hypothèses raisonnables (absence de fluide interstitiel et de basculement des blocs), nous avons montré que le modèle se prête, à l'évaluation de la stabilité d'un empilement de blocs, en utilisant la théorie des blocs [Goodman et Shi, 1985].

Nous avons mis en évidence, dans le processus A, une évacuation prioritaire des amas de petits blocs. Ce phénomène souligne l'importance du facteur d'encombrement géométrique dans la stabilité de l'escarpement, le dégagement des blocs de petite taille étant relativement plus aisé que celle des plus gros.

Nous avons également étudié l'apparition

d'avalanches dans le phénomène d'éboulement, pour les deux types de processus. Lorsqu'aucune fracture recoupante n'existe dans un découpage de type B, les volumes sont évacués de façon régulière, et le volume mobilisé par l'éboulement est minimal. Ce type d'assemblage correspond donc à une configuration de stabilité maximale. Par opposition, le découpage de type A engendre un nombre élevé d'avalanches par décollement des blocs, et permet une vidange importante, indiquant une instabilité.

En introduisant dans le modèle des fractures recoupantes, on accroît largement l'instabilité du découpage de type A, mais le phénomène est encore plus affirmé dans le processus B, qui montre alors souvent des avalanches qui trouvent leur origine dans le glissement, et dont l'ampleur est beaucoup plus grande que dans le processus A.

Cette inversion du comportement par l'introduction de fractures recoupantes tend à confirmer le rôle déterminant de facteurs topologiques et géométriques dans les phénomènes d'éboulement, et dans la fracturation en général.

Au-delà de cette voie d'exploration théorique, notre modèle rend donc possible l'intégration de paramètres réels. Il est donc possible, après un repérage sur le terrain des discontinuités majeures et du type de découpage impliqué (par télémétrie par exemple) de reproduire facilement un escarpement naturel et d'en étudier géométriquement la vidange éventuelle par éboulement, dans un but d'évaluation de l'aléa.

Prospective

La conception de notre modèle OBSIFRAC intègre de façon séparée un système souple et évolutif de description *statique* des données naturelles de fracturation, et un ensemble de codes de calcul permettant une gestion *dynamique* de ces données. Cette modularité données-traitements, qui facilitera l'évolution de notre modèle, ouvre la voie à de vastes champs d'investigation.

D'un point de vue fondamental, il devrait contribuer à une meilleure connaissance géométrique et topologique des systèmes de fractures en permettant notamment de tester des moteurs fracturants plus complexes. Il sera ainsi utile d'explorer l'effet de répartitions hétérogènes

de *germes* dont la position serait donnée par une distribution discrète ou par un processus fractal ou multifractal. De la même façon, des contraintes complexes sur l'*orientation* des plans de fractures pourront être intégrées pour tenter par exemple de reproduire différentes phases chronologiques de la fracturation observée *in situ*. Il est envisageable également de contrôler, de manière plus ou moins élaborée, la *forme* des blocs générés ou leur volume, ce contrôle variant éventuellement avec l'avancement du découpage. De tels développements sont intéressants dans le cadre de l'étude de stabilité de versants rocheux. Au-delà des hypothèses de planéité des fractures et donc de convexité des blocs, il est théoriquement possible de construire avec notre modèle des blocs comportant une ou plusieurs faces concaves : un tel bloc peut en effet être vu comme l'assemblage de blocs convexes. C'est là une voie importante qui enrichira considérablement le modèle. L'effet du recoupement des fractures mérite également une attention particulière. Il est facile d'introduire dans OBSIFRAC un taux de recoupement, qu'on pourra ensuite relier à la perméabilité hydraulique observée. Il serait intéressant de traduire la notion de jeu des discontinuités existantes, en permettant au modèle de poursuivre l'extension de certaines fractures.

Sur un plan plus pratique, l'enrichissement de chaque élément discret ou "objet" informatique du modèle (fracture, bloc, face, arête, nœud) par des paramètres physiques rendra possible de nombreux développements. A titre d'exemples, dans l'exploration du comportement hydraulique et hydrodynamique des réseaux, il serait possible d'introduire pour chaque bloc, et pour chaque fracture une perméabilité spécifique. Pour des applications géotechniques, il serait intéressant d'attribuer à chaque fracture un coefficient de friction propre, qui peut être, par exemple, fonction de son épaisseur. La mise en œuvre de modèles de solidité du bloc, similaires à ceux du plan de fragilité ou du pilier sain (voir Première Partie) permettrait d'introduire dans la modélisation de stabilité mécanique d'un escarpement une contrainte sur l'écrasement du bloc.

Sur le plan des moyens informatiques, enfin, il faut signaler que de telles extensions de la capacité d'investigation du modèle nécessiteront l'utilisation d'une famille de SGBD plus puissants (Oracle, Sybase, ...), adaptés à la gestion de nombres d'objets quasiment illimités. La souplesse de conception du modèle actuel facilitera cette migration.

REMERCIEMENTS

Fil conducteur d'une portion de ma vie, cette thèse est le produit d'un acharnement quotidien à travers déboires et découvertes, déceptions et enthousiasme. Telle est sans doute la recherche...

Ce travail est né à la fin de l'année 1993, de l'accueil profondément amical qui me fut réservé par Monsieur le Professeur Marc Tardy. De la tectonique sur tableau noir, aux écaïlles jurassiennes du front subalpin, j'ai toujours apprécié son aide chaleureuse, et je tiens à lui exprimer toute ma gratitude pour avoir aussi bien su faire partager sa passion.

C'est Monsieur Thierry Villemin qui a rendu possible l'aboutissement de ce travail. En intégrant dans le choix du sujet, tout comme dans son propre emploi du temps, les contingences particulières de disponibilité qui furent les miennes, en balisant mon parcours six années durant, il a toujours gardé à l'esprit mes objectifs. En faisant sienne ma quête incessante de temps, il m'a beaucoup appris – de la logique non inversée à l'art de ne pas se décourager –, suggéré, écouté jour après jour, mois après mois. Je veux qu'il soit assuré de ma profonde reconnaissance, à laquelle j'ajoute un coup de chapeau pour sa patience.

J'exprime mes sincères remerciements à mon employeur actuel, le Conseil Général de la Savoie, et en particulier à Monsieur Faure, ex-Directeur Général des Services et Monsieur Devos, Directeur Informatique, qui ont favorisé ma disponibilité pour concrétiser ce projet.

Les remarques fort constructives de Madame Françoise Bergerat et de Monsieur le Professeur Robert

Laurini, qui ont bien voulu assumé le rôle de rapporteurs, m'ont été très utiles pour parfaire mon travail. Je leur sais gré de leur pertinence.

Que Monsieur Jean-Pierre Asté, dont je partage certaines préoccupations à caractère... territorial, Monsieur Masure, et Monsieur Desmet qui ont bien voulu examiné mon travail, soient remerciés pour leur collaboration.

Je remercie Monsieur Miguel Tomasena pour nos discussions sur les apports, encore hypothétiques de l'intelligence artificielle à la géologie structurale, Monsieur Morlaye pour ses éclairages mathématiques, et Monsieur Fontvieille pour ses confirmations statistiques.

Messieurs André Gérard (SOCOMINE) et Gérard Massonnat (ELF) ont contribué à rendre mon modèle plus réaliste en apportant leur observations sur les données prises en compte sur le site de Soultz-sous-Forêts. Je les en remercie.

Mon collègue Christophe Cagnon a bien voulu prendre en charge la tâche lourde et délicate de mise en forme de ce mémoire. Je rends hommage à son dévouement et à la qualité de son travail.

Enfin, un immense merci à mes proches, à mes amis (« Alors, cette thèse ? ») mais surtout à ma famille, centre du monde, creuset où tout a été possible grâce à l'amour de Sylvie, à la patience de Jean-Yves, et à la compréhension de Charly.

BIBLIOGRAPHIE

- AKI K. (1965). – Maximum likelihood estimate of b in the formula $\log(N)=a-bM$ and its confidence limits. *Bull. Earthquake Res. Inst.*, Tokyo Univ., **43**, 237-239.
- ALLEGRE C. J., LE MOUËL J. L., PROVOST A. (1982). – Scaling rules in rock fracture and possible implications for earthquake prediction. *Nature*, **297**, 47-49.
- ARCHARD J. F. (1958). – Elastic deformation and the law of friction. *Proc. Roy. Soc.*, London, A **243**, 190-205.
- ASTÉ J. P., ASTÉ T., BADJI N. (1996). – 3D-BLOC: Photogrammetry, block theory and cliff equilibrium, some recent developments. *Landslides, Sennezet (ed.)*, Balkema, Rotterdam.
- BAK P., TANG C., WIESENFIELD K. (1988). – Self-Organized Criticality. *Phys. Rev. A.*, **38**, 364-374.
- BARTON C. C., LA POINTE P. R. (1995). – Fractals in the Earth Sciences. *Plenum Press*, New York, 265 p.
- BARTON C. C., SCHUTTER T. A., PAGE W. R., SAMUEL J. K. (1987). – Computer generation of fracture networks for hydrologic-flow modeling. *Eos Trans. Am. Geophys. Union*, **68**, 44, 1295.
- BEAR J. (1972). – Dynamics of fluids in porous media. *American Elsevier Ed.*, 764 p.
- BELFIELD W. C. (1994). – Multifractal characteristics of natural fracture apertures. *Geophys. Res. Lett.*, **21**, 2641-2644.
- BENETT J. G. (1936). – Broken coal. *J. Inst. Fuel*, **10**, 22-39.
- BERGÉ P., POMEAU Y., DUBOIS-GANGE M. (1997). – Des rythmes au chaos. *Ed. Odile Jacob*, Paris, 311 p.
- BERGÉ P., POMEAU Y., VIDAL C. (1988). – L'ordre dans le chaos: vers une approche déterministe de la turbulence. *Hermann*, Paris, 352 p.
- BERKOWITZ B., ADLER P. M. (1998). – Stereological analysis of fracture network structure in geological formations. *Journal of Geophysical Research* **103(B7)**, 15339-15360.
- BIEGEL R. L., SAMMIS C. G., DIETRICH J. H. (1989). – The frictional properties of a simulated gouge having a fractal particle distribution. *J. Struct. Geol.*, **11**, 827-846.
- BILLAUX D., CHILES J. P., HESTIR K., LONG J. (1989). – Three dimensional statistical modelling of a fractured rock mass - an example from the Fanay-Augeres mine. *Int. Jour. of Rock Mech. and Minig Science & Geomech. Abstracts* **26**, 281-289.
- BILLAUX D. (1990). – Hydrogéologie des milieux fracturés. Géométrie, connectivité et comportement hydraulique. *Doc. BRGM*, **186**, 277p.
- BOOCH G. (1994). – Object-Oriented Design (OOD). *Addison Wesley Press*.
- BORGOS H. G., COWIE P.A., DAWERS N.H. (2000). – Practicalities of extrapolating 1D fault and fracture size-frequency distributions to higher dimensional samples. *en cours de publication*.
- BOURRELIER P. (1998). – Vers l'exploitation géothermique des Hot Dry Rocks (HDR). *Draft Proc.*, 4th Int. HDR Forum.
- BOWDEN F. P. (1954). – The friction of non-metallic solids. *J. Inst. Petrol.*, **40**, 89-103.
- BOWDEN F. P., TABOR D. (1950). – The friction and lubrication of solids, Vol.1. Oxford, *Clarendon Press*.
- BOWDEN F. P., TABOR D. (1964). – The friction and lubrication of solids, **2**, *Clarendon Press*, Oxford.
- BROADBENT S. R., HAMMERSLEY J. M. (1957). – Percolation processes. *Proc. Camb.Phil. Soc.*, **53**, 629-641.
- BRUEL D. (1998). – Using a discrete fracture network approach to build a model for the Soultz heat exchanger and to derive its main parameters from in-situ measurements. *Draft Proc.*, 4th Int. HDR Forum.
- CACAS M. C. (1989). – Développement d'un modèle tridimensionnel stochastique discret pour la simulation de l'écoulement et des transferts de masse et de chaleur en milieu fracturé. *Thèse Doct. École Nat. Sup. Mines, Paris*.
- CARLIER E. (1983). – Influence de la fracturation sur le comportement hydrodynamique et hydrodispersif des calcaires paléozoïques de l'Avesnois (Nord). *Thèse 3è cycle Univ. Sciences Lille*, 224 p.
- CHESNEAUX J. M., BOISSON F. (1988). – Le calcul scientifique sur ordinateur. *Dunod Ed.*, 189 p.
- CHILDS C., WALSH J. J., WATTERSON J. (1990). – A method for estimation of the density of fault displacements below the limits of seismic resolution in reservoir formations. A.T. Builder (Ed.), North Sea Oil & Gas Reservoirs II. *Graham and Trotman*, London, 309-318.
- CHILES J. P. (1988). – Fractal and geostatistical methods for modelling of a fracture network. *Math. Geol.*, **20**, **6**, 631-654.
- CLARK G. B. (1987). – Principles of Rock Fragmentation. *J. Wiley & sons*, New York, 610 p.
- CODD E. F. (1970). – A relational Model of Data for Large Shared Data Banks. *Comm. ACM*, **13**, **6**, June 1970, 377-387.
- CODD E. F. (1972). – Further normalization of the database relational model, in Database Systems, RUSTIN R. *Prentice Hall Ed.*, 377-387.
- CODD E. F. (1982). – Relational database: a practical foundation for productivity. *Comm. ACM* **25** (**2**), February 1982, 109-117.
- CRUDEN D. M. (1977). – Describing the size of discontinuities. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstracts*, **14**, 133-137.
- CUNDALL P. (1971). – A computer model for simulating progressive, largescale movements in blocky rock systems. *Proc. International Symposium on Rock Fractures*, Nancy, France (Int. Soc. for Rock Mech.).
- CURRAN D. R., SHOCKEY D. A., SEAMAN L., AUSTIN M. (1977). – Mechanisms and models of cratering in earth media, in Impact and Explosion Cratering, RODDY D. J., PEPIN R. O., MERRILL R. P., eds. 1057-1087, *Pergamon Press*, New York.
- DATE C. J. (1981). – An introduction to database systems (3rd ed.). *Addison Wesley*.
- DATE C. J. (1986). – Relational database: selected writings. *Addison Wesley*.
- DAVY P., SORNETTE A., SORNETTE D. (1990). – Some consequences of a proposed fractal nature of continental faulting. *Nature*, **348**, 56-58.
- DESHOWITZ W. (1984). – Rock Joint Systems. *Ph. D. dissertation, MIT*, Cambridge, Mass.

- DEZAYES C., VILLEMIN T., GENTER A., ANGELIER J. (1995). – Origin and significance of relaxation fractures in EPS1 drilling cores (Soultz-sous-Forêts, Rhinegraben). *C.R. Acad. Sci. Paris*, 10 juillet 1995.
- DEZAYES C., VILLEMIN T., PECHER A. (2000). – Microfracture pattern compared to core-scale fractures in the borehole of Soultz-sous-Forêts granite, Rhine graben, France. *Journal of Structural Geology* 4-5/2, 1-11.
- DEZAYES C. (1995). – Caractérisation et interprétation d'un volume rocheux fracturé à partir de données de forages. *Thèse Doctorat*, Univ. de Savoie, 277 p.
- DUBOIS J. (1995). – La dynamique non linéaire en physique du globe. *Masson Ed.*, 263 p.
- DUPIN J. M., ANGELIER J., SASSI W. (1994). – L'hypothèse de jeux de failles indépendamment contrôlés par un état de contrainte unique est-elle valable ? Une approche numérique 3D. *Bull. Soc. Géol. France*, 165, 4, 317-328.
- EINSTEIN H. H., BAECHER G.B. (1983). – Probabilistic and statistical methods in engineering geology, specific methods and examples. Part I: Exploration. *Rock Mech. Rock. Eng.*, 16, 39-72.
- EVANS M., HASTINGS N., PEACOCK B. (1993). – Statistical distributions. *Wiley & sons*, New York.
- FALCONER K. (1990). – Fractal Geometry: mathematical foundations and applications. *Wiley and sons*, Chichester.
- FUJIWARA A., KAMIMOTO G., TSUKAMOTO A. (1977). – Destruction of basaltic bodies by high-velocity impact. *Icarus*, 31, 277-288.
- GALE J. E., SCHAEFER R. A., CARPENTER A. B., HERBERT A. (1991). – Collection, analysis and integration of discrete fracture data from the Monterey formation for fractured reservoir simulations. *66th Annu. Soc. Petroleum Eng. Tech. Conf.*, 22741, 823-834.
- GARDARIN G., VALDURIEZ P. (1987). – Bases de données relationnelles: analyse et comparaison de systèmes. *Eyrolles*, Paris.
- GENTER A., CASTAING C., BOURGINE B., CHILES J. P. (1997). – An attempt to simulate fracture systems from well data in reservoirs. *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.* 34, 3-4, 044.
- GENTER A., DEZAYES C., GENTIER S., LEDESERT B., SAUSSE J. (1998). – Conceptual fracture model at Soultz based on geological data. *Draft Proc., 4th Int. HDR Forum*.
- GENTER A., TRAINEAU H., DEZAYES C., ELSASS P., LEDESERT B., MEUNIER A., VILLEMIN T. (1995). – Fracture analysis and reservoir characterization of the granitic basement in the HDR Soultz project (France). *Geotherm. Sci & Tech.*, Vol. 4(3), 189-214.
- GENTIER S. (1986). – Morphologie et comportement hydromécanique d'une fracture naturelle dans le granite sous contrainte normale. Étude expérimentale et théorique. *Doc. BRGM* 134.
- GERARD A., BAUMGÄRTNER J., BARIA R., JUNG R., GENTIER S., GENTER A. (1998). – Elements for a conceptual model of the underground heat exchanger at Soultz-sous-Forêts, France. *Draft Proc., 4th Int. HDR Forum*.
- GIANI G. P. (1992). – Rock slope stability analysis. *Balkema*, Rotterdam.
- GILLESPIE P. A., HOWARD C., WALSH J. J., WATERSON J. (1993). – Measurement & characterization of spatial distributions of fractures. *Tectonophysics*, 22, 113-141.
- GOGUEL J. (1980). – Géologie de l'environnement. *Masson Ed.*, Paris, 192 p.
- GOODMAN R., SHI G. (1985). – Block Theory and its application to rock engineering. *Prentice-Hall Inc.*, Englewood Cliffs, New Jersey, 338 p.
- GOUDIE A. (1990). – Geomorphological techniques. *Unwin Hyman*.
- GRADY D. E., KIPP M. E. (1987). – «Dynamic rock fragmentation» in *Fracture mechanics of rock*. B. Atkinson Editor, *Academic Press Inc.*, London.
- GUEGUEN Y., PALCIAUSKAS V. (1992). – Introduction à la physique des roches. *Hermann Edition*, 299 p.
- GUTENBERG B., RICHTER C. F. (1954). – Seismicity of the Earth and associated phenomena (2nd ed.). *Princeton University Press*, Princeton, New Jersey.
- HADJIGEORGIOU J., THERRIEN R. (1996). – An integrated strategy for field data collection, three-dimensional joint representation and modelling of fluid flow in fractured rock masses. *Proceedings of Eurock'96 international symposium*, 1231-1236.
- HAHN G. J., SHAPIRO S.S. (1967). – Statistical models in engineering. *Wiley & sons*, New York.
- HALBWACHS Y., COURRIOUX G., RENAUD X., REPUSSEAU P. (1995). – Topological and geometric characterization of fault networks using 3D-dimensional generalized maps. *Int. Ass. for Math. Geology*, 96, 625.
- HALSEY T. C., JENSEN M. H., KADANOFF L. P., PROCACCIA I., SHRAIMAN B. I. (1986). – Fractal measures and their singularities: the characterization of strange sets. *Phys. Rev. A* 33, 1141-1151.
- HANCOCK P. L., AL-KAHKDI, BARAKA A. A., BEVAN T. G. (1987). – Aspects of analysing brittle structures. *Ann. Tectonicae*, 1, 5-19.
- HARTMANN W. K. (1969). – Terrestrial, lunar and interplanetary rock fragmentation. *Icarus*, 10, 201-213.
- HEFFER K. J., BEVAN T. G. (1990). – Scaling relationships in natural fractures: Data, theory and application. *Europec 90, Soc. of Petroleum Engineers*, 2, 367-376.
- HENRY J. (1983). – Méthodes modernes de géologie de terrain, vol. 2a et 2b. *Technip Ed.*, 184 p. et 72 p.
- HENTSCHEL H. G. E., PROCACCIA I. (1983). – The infinite number of generalized dimensions of fractals and strange attractors. *Physica D*, 8, 435-444.
- HOECK E., BRAY J. (1981). – Rock slope engineering (3rd ed.). *IMM*, London.
- HOLTON D., GARDINER M. (1998). – Practical and theoretical considerations : *HDR. Draft Proc., 4th Int. HDR Forum*.
- HUANG J., TURCOTTE D. L. (1989). – Fractal mapping of digitized images: application to the topography of Arizona and comparisons with synthetic images. *J. Geophys. Res.* 94, 7491-7495.
- HUANG J., TURCOTTE D. L. (1990). – Chaotic seismic faulting with a mass-spring model and velocity weakening friction. *Pure Appl. Geophysics* 138, 569-589.
- JABOYEDOFF M., PHILIPPOSIAN F., MANIN M., MARRO C., ROULLIER J. D. (1996). – Distribution spatiale des discontinuités dans une falaise. Approche statistique et probabiliste. PNR 31. *Hochschulverlag AG an der ETH Zürich*.
- JACKSON P., SANDERSON D. J. (1992). – Scaling of fault displacements from the Badajoz Cordoba shear zone, SW Spain. *Tectonophysics*, 210, 179-190.
- JAEGER J. C. (1959). – The frictional properties of joints in rocks. *Geofis. Pura appl.*, 43, 148-158.
- JAEGER J. C., COOK N. G. W. (1969). – Fundamentals of Rocks Mechanics. *Chapman and Hall Ltd*, London.
- KIRALY L. (1971). – Groundwater flow in heterogeneous, anisotropic fractured media: a simple two-dimensional electric analog. *Journal of hydrology* 12, 255-261.
- KLACKA J. (1992). – Mass distribution in the asteroid belt. *Earth moon planets*, 56, 47-52.
- LONG J. C. S., WITHERSPOON P. (1985). – The relationship of the degree of interconnection to permeability in fracture networks. *J. Geophys. Res.*, 90, B4, 3087-3098.

- LONG J. C. S., GILMOUR P., WITHERSPOON P. (1985). – A model for steady fluid flow in random tridimensional networks of disk-shaped fractures. *Water Ressources Res.*, **21**, 8, 105-115.
- LONG J. C. S. (1983). – Investigation of equivalent porous medium permeability in networks of discontinuous fractures. *Ph. D. thesis, Univ. California, Berkeley*, 277 p.
- LONG J. C. S., REMER J. S., WILSON C. R., WITHERSPOON P.A. (1982). – Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures. *Water Resour. Res.*, **18**, 3, 645-658.
- MADDEN T. R. (1976). – Random networks and mixing laws. *Geophysics*, **41**, 1104-1125.
- MADDEN T. R. (1983). – Microcrack connectivity in rocks: A renormalization group approach to the critical phenomena of conduction and failure in crystalline rocks. *J. Geophys. Res.*, **88**, 585-592.
- MANDELBROT B. B. (1967). – How long is the coast of Britain ? Statistical self-similarity and fractional dimension. *Science*, **155**, 636-638.
- MANDELBROT B. B. (1974). – Intermittent turbulence in self similar cascades: divergence of high moments and dimension of the carrier. *J. Fluid Mech.*, **62**, 331.
- MANDELBROT B. B. (1975). – Stochastic models for the earth's relief, the shape and the fractal dimension of the coastlines, and the number-area rule for islands. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, **72**, 3825-8.
- MANDELBROT B. B. (1975). – Les objets fractals. *Flammarion*, Paris, 212 p.
- MANDELBROT B. B. (1982). – The fractal geometry of nature. *W. H. Freeman*, San Francisco.
- MANDELBROT B. B., WALLIS J.R. (1968). – Noah, Joseph, and operational hydrology. *Water Resour. Res.*, **4**, 909-918.
- MANDELBROT D. D. (1989). – Multifractal measures, especially for the geophysicist, in *Fractals in Geophysics*. CH Scholz, BB Mandelbrot eds., *Birkhäuser Verlag*.
- MANDL G. (1988). – Mechanics of tectonic faulting. *Elsevier*, Amsterdam, 407 p.
- MARLE C. (1967). – Écoulements monophasiques en milieu poreux. *Rev. IFP*, **22**, 10, 1471-1509.
- MARRETT R., ALLMENDIGER R.W. (1992). – Amount of extension on small faults: an example from the Viking graben. *Geology*, **20**, 47-50.
- MASSONAT G., MANISSE E. (1994). – Modélisation des réservoirs fracturés et recherche de paramètres équivalents: étude de l'anisotropie verticale de perméabilité. *Bull. Centres Rech. Elf Aquitaine*, **18**, 1, 171-209.
- Massoud H. (1987). – Modélisation de la petite fracturation par les techniques de la géostatistique. *Doc BRGM*, **155**, 202 p.
- MATHERON G. (1965). – Les variables régionalisées et leur estimation. *Masson*, Paris, 306 p.
- MATHERON G. (1970). – La théorie des variables régionalisées et ses applications. *Les cahiers du Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleau*, **5**, ENSMP, 212 p.
- MAVEYRAUD (1998). – Exploration numérique de la friction solide à grande vitesse de glissement par un code explicite 3D entièrement dynamique. *Thèse, Université de Nice - Sophia Antipolis*, 146 p.
- MAY R. M. (1976). – Simple mathematical models with very complicated dynamics. *Nature*, **261**, 459-67.
- MILTENBERGER P. (1983). – Modèle numérique pour l'évolution spatio-temporelle des failles. Rapport de DEA, Université de Nice-Sophia-Antipolis.
- MILTENBERGER P., SORNETTE D., VANNESTE C. (1993). – Fault self-organization as optimal random paths selected by critical spatiotemporal dynamics of earthquakes. *Phys. Review Letters*, **71**, 21, 3604-3607.
- MOENCH A. F. (1984). – Double porosity models for a fissured groundwater low system. *Water Resour. Res.*, **20**, 831-846.
- MORGAN J. (1994). – Three dimensional strain analysis in physical models of geological structures. *Tectonophysics*, **230**, 181-198.
- MURELL S. A. F. (1965). – The effect of triaxial stress systems on the strength of rocks at atmospheric temperatures. *Geophys. J.*, **10**, 231-281.
- ODLING N. E. (1997). – Scaling and connectivity of joint systems in sandstones from western Norway. *Journal of Stru. Geol.*, **19**, 10, 1257-1271.
- OKUBO P. G., AKI K. (1987). – Fractal geometry in the San Andreas fault system. *J. Geophys. Res.*, **92**, 345-355.
- OUILLOU G. (1995). – Application de l'analyse multifractale et de la transformée en ondelettes anisotropes à la caractérisation géométrique multi-échelle des réseaux de failles et de fractures. *Thèse Univ. Nice-Sophia Antipolis*, 352 p.
- OUILLOU G., CASTAING C., SORNETTE D. (1996). – Hierarchical geometry of faulting. *J. Geophys. Res.*, **101B**, 5477-5487.
- PICKERING G., BULL J. M., SANDERSON D. J. (1995). – Sampling power-law distributions. *Tectonophysics*, **248**, 1-20.
- POINCARÉ H. (1951). – Oeuvres complètes, 11 vol. *Gauthier-Villars*.
- PRIENOW D., CLAUSER C. (1998). – Heat and Fluid flow in the Rhine graben: Regional and local models for a Hot Dry Rock system. *Draft Proc., 4th Int. HDR Forum*.
- PRIEST S. D., HUDSON J. A. (1981). – Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys. *Int.J.Rock.Mech.Sci.Geomech.Abstr.*, **18**, 183-197.
- PRIGOGINE I. (1997). – Les lois du chaos. *Flammarion*, 126 p.
- REDNER S. (1990). – Fragmentation, in *Statistical models for the fracture of disordered media*. Herrmann et Roux, *Elsevier Science Publishers*.
- REISS L. H. (1980). – Reservoir engineering en milieu fracturé. *Technip*, Paris, 136 p.
- RICHARDSON L. F. (1961). – The problem of contiguity: an appendix of statistics of deadly quarrels. *General Systems Yearbook*, **6**, 139-187.
- ROBINSON P. C. (1983). – NAMNET : Network flow program. *Rapport de l'AERE Harwell, contrat CCE 209-81-7 WAQ-UK*, 28 p.
- ROBINSON P. C. (1984). – Connectivity, flow and transport in network models of fractured media. *Ph. D. dissertation, St Catherine's College, Oxford*.
- ROUILLER J. D., JABOYEDOFF M. (1998). – Pentes instables dans le Pennique valaisan. MATTEROCK: Une méthode d'auscultation des falaises et de détection des éboulements majeurs potentiels. *VDF, Zürich*.
- ROUILLER J. D., JABOYEDOFF M., MARRO M., PHILIPPOSIAN F. (1997). – MATTEROCK: méthodologie d'étude d'instabilités de falaises et d'appréciation du danger. *Actes de la journée d'automne de la Société Suisse de Mécanique des sols et des roches*.
- ROULEAU A. (1984). – Statistical characterization and numerical simulation. *PhD Dissertation, Univ. of Waterloo, Ontario, Canada*.

- ROULEAU A., GALE J. E. (1985). – Fracture size, interconnectivity and ground water flow: a site-specific stochastic analysis. *Symposium «L'approche stochastique des écoulements souterrains», Montvillargenne, 3-6 juin 1985*, 514-522.
- ROUX S., HANSEN A. (1990). – Introduction to multifractality in Disorder and fracture. Charmet, Roux and Guyon Editors, *Plenum Press*.
- RUELLE D., TAKENS F. (1971). – On the nature of turbulence. *Comm. Math. Phys.*, **20**, 167-192; **23**, 343-344.
- RUMBAUGH J. (1995). – Object Modeling Technique (OMT) Modélisation et conception orientée objet. *Masson Ed.*
- SAMMIS C. G., BIEGEL R. L. (1989). – Fractals, fault gouge and friction. *Pure Appl. Geophys.*, **131**, 255-271.
- SAMMIS C. G., KING G. C. P., BIEGEL R. L. (1987). – The kinematics of gouge deformation, *Pure Applied Geophys*, **125**, 777-812.
- SARTORI M., SCHAFER M., ESCHER A. (1991). – Rapport concernant un premier stade d'évaluation des causes géologiques de l'éboulement de Randa. *Rapport CRSFA/91*; 35.
- SCHOUTENS J. E. (1979). – Empirical analysis of nuclear and high-explosive cratering and ejecta, *Nuclear Geoplosics Sourcebook*, **55**, 2, 4, DNA 65 01H-4-2, Def. Nucl. Agency, Bethesda, Md.
- SCHROEDER M. (1991). – Fractals, chaos, power laws: Minutes from an Infinite Paradise. *Freeman*, New York, 430 p.
- SMALLEY R. F., TURCOTTE D. L., SOLLA S. A. (1985). – A renormalization group approach to the stick-slip behavior of faults. *J. Geophys. Res.*, **90**, 1894-1900.
- SNOW D. T. (1969). – Anisotropic permeability of fractured media. *Water Ressources Res.*, **5**, 6, 1273-1289.
- SORNETTE A. (1990). – Lois d'échelle dans les milieux fissurés. Application à la lithosphère. *Thèse Doct. Univ. Paris Sud*, 250 p.
- SORNETTE A., SORNETTE D. (1989). – Self-Organized Criticality and Earthquakes. *Europhys. Lett.*, **9**, 197-202.
- SORNETTE D., DAVY P., SORNETTE A. (1990). – Structuration of the lithosphere in plate tectonics as a self-organized critical phenomenon. *J. Geophys. Res.*, **95**, 17353-17361.
- STEACY S. J., SAMMIS C. G. (1991). – An automaton for fractal patterns of fragmentation, *Nature*, **353**, 250-252.
- TENZER H., SCHANZ U., HOMEIER G. (1998). – Development and characterization of a heat exchanger at Soultz-sous-Fo-rêts: flow logs, joint system, and hydraulic active fractures. *Draft Proc., 4th Int. HDR Forum*.
- TEZUKA K., WATANABE K., MIYAIRI M. (1998). – Deterministic and stochastic approach to building fracture network model of Hijiori HDR reservoir. *Draft Proc., 4th Int. HDR Forum*.
- TURCOTTE D. L. (1986). – Fractals and Fragmentation. *J. Geophys. Res.*, **91**, 1921-1926.
- TURCOTTE D. L. (1997). – Fractals and Chaos in Geology and Geophysics, 2nd Edition. *Cambridge University Press*, 398 p.
- UTSU T. (1965). – A method for determining the value of b in a formula $\log(n)=a-bM$ showing the magnitude-frequency relation for earthquakes. *Geophys. Bull. Hokkaido Univ.*, **13**, 99-103.
- VELDE B., DUBOIS J., MOORE D., TOUCHARD G. (1991). – Fractal patterns of fractures in granites. *Earth and Planet. Sc. Letters*, **104**, 25-35.
- VELDE B., DUBOIS J., TOUCHARD G., BADRI A. (1990). – Fractal analysis of fractures in rocks: the Cantor's Dust method. *Tectonophysics*, **179**, 345-352.
- VENEZIANO D. (1978). – Probabilistic Model of Joints in Rock. Unpublished manuscript, *M.I.T.*, Cambridge, cité par BILLAUX, 1990.
- VIGNES-ADLER M., LE PAGE A., ADLER P. M. (1991). – Fractal analysis of fracturing in two African regions, from satellite imagery to ground scale. *Tectonophysics*, **196**, 69-86.
- VILLEMIN T., ANGELIER J., SUNWOO C. (1987). – Fractal distribution of fault length and offsets: implications on brittle deformation evaluation: the Lorraine coal basin (NE France). *C.R. Acad. Sc. Paris*, **305**, 1309.
- VOSS R.F. (1988). – Fractals in nature: from characterization to simulation, in *The Science of Fractal Images*. HO. Peitgen & D. Saupe eds., *Springer Verlag*, New York.
- WAGNER A., LEITE E., OLIVIER R. (1990). – Shiva: A landslide hazard mapping software. *Inst.Géophys.Univ.Lausanne & ITECO (Affoltern a.A.)*.
- WALSH J. J., WATERSON J., YIELDING G. (1991). – The importance of small scale faulting in regional extension. *Nature*, **351**, 391-393.
- WALSH J. J., WATERSON J., YIELDING G. (1992). – Determination and interpretation of fault size populations: procedures and problems. *Trondheim Conference Nov/Dec 1992*.
- WALSH J. J., WATERSON J. (1993). – Fractal analysis of fracture patterns using the standard box-counting technique: valid and invalid methodologies. *Journal of Stru. Geol.*, **15**, 12, 1509-1512.
- WILKES, GUYON E., DE MARSILY G. (1985). – Water penetration through fractured rocks: test of a tridimensional percolation description. *J. int. Assoc. Math. Geol.* **17**, 17-27.
- WILSON S. A., HENDERSON J., MAIN I. (1996). – A cellular automaton fracture model: the influence of heterogeneity in the failure process. *Journal of Stru. Geol.*, **18**, 2/3, 343-348.
- WU Q., BORKOVEE M., STICHER H. (1993). – On particle-size distributions in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **57**, 883-890.
- YIELDING G., NEEDHAM T., JONES H. (1996). – Sampling of fault populations using subsurface data: a review. *Journal of Stru. Geol.*, **18**, 2/3, 135-146.
- YOUNG A. (1972). – Slopes. *Longman Ed.*

LISTE DES FIGURES

Fig. 1.– Les empreintes du Déluge (« Cataclysmi Reliquia ») sur les sommets des Alpes helvétiques	7
Fig. 2.– Auto-similarité aux échelles kilométrique, métrique et centimétrique. Région du Mount Abbot, Sierra Nevada.	10
Fig. 3.– Etude de détermination du Volume Élémentaire Représentatif par Long et Witherspoon [1985]	13
Fig. 4.– Perméabilité équivalente en fonction de la dimension du domaine étudié, en cm, et de la dimension des fractures	14
Fig. 5.– Schématisation d'un réseau de fractures par un modèle de type double porosité (D'après Warren et Root [1963])	14
Fig. 6.– Relation entre perméabilité de fissuration, porosité de fissuration, dimension du bloc, et ouverture des fissures	16
Fig. 7.– Réseau de fractures simulé en deux dimensions [Robinson, 1984]	17
Fig. 8.– Réseau de fractures simulé en trois dimensions [Long <i>et al.</i> , 1985]	18
Fig. 9.– Génération stochastique d'un réseau tridimensionnel de fractures représentées par des disques (d'après Billaux [1990])	18
Fig. 10.– Réseau tridimensionnel stochastique de fractures représentées par des rectangles (d'après Gale <i>et al.</i> [1991])	19
Fig. 11.– Mesure d'une portion de côte de Bretagne, par la méthode de Richardson [1961]	21
Fig. 12.– Détermination de la dimension fractale de portions de côtes rocheuses et frontières, selon Richardson [1939]	22
Fig. 13.– Calcul empirique de la dimension de Hausdorff sur un graphe bilogarithmique. (D'après Dubois [1995])	22
Fig. 14.– Illustration de la méthode de recouvrement utilisée par Okubo et Aki [1987] sur le système de failles de San Andreas	23
Fig. 15.– Illustration de la méthode de comptage de boîtes pour le calcul de la dimension fractale	24
Fig. 16.– Construction d'un fractal auto-affine élémentaire. [Turcotte, 1997]	24
Fig. 17.– Application de la méthode de comptage de boîtes sur un fractal auto-affine. [Turcotte, 1997]	25
Fig. 18.– Effets de bord dans la méthode de comptage de boîtes	25
Fig. 19.– Elimination des effets de bord dans la méthode comptage de boîtes par restriction du domaine couvert	26
Fig. 20.– Mise en évidence d'une loi fractale avec la méthode de comptage de boîtes, pour le champ de fractures de la figure 19 [Walsh et Watterson, 1993]	26
Fig. 21.– Réseaux de fractures utilisés par Velde <i>et al.</i> [1990] dans la méthode de la poussière de Cantor	27
Fig. 22.– Détermination de la dimension par la méthode de la poussière de Cantor	27
Fig. 23.– Exemple de détermination de la dimension fractale par la méthode de la poussière de Cantor [Velde <i>et al.</i> , 1990] sur les grès saoudiens (cf fig. 21)	28
Fig. 24.– Spectre des singularités ou tracé $f(\alpha)$, α et ses propriétés géométriques. (D'après Mandelbrot [1989])	29
Fig. 25.– Dimension fractales obtenues par fragmentation expérimentale sur divers objets (D'après Turcotte [1997])	31
Fig. 26.– La loi de distribution de Pareto $f(x) = \frac{a}{(1+x)^{a+1}}$ pour différentes valeurs de a	31
Fig. 27.– Le modèle de fragmentation de Sammis <i>et al.</i> [1987]	32
Fig. 28.– Détermination de la dimension fractale par le nombre cumulés N_c de blocs de dimension linéaire r en coordonnées bilogarithmiques dans le modèle de Sammis <i>et al.</i> [1987]. D'après Turcotte [1997]	32
Fig. 29.– Les quatre premiers stades de la fragmentation dans le modèle du cube d'Allègre <i>et al.</i> [1982]	33
Fig. 30.– Le processus de fragmentation dans le modèle du cube d'Allègre	33
Fig. 31.– L'expression de la dimension fractale D en fonction de la probabilité de fragmentation P_c d'une cellule, dans le modèle du cube d'Allègre [Turcotte, 1986]	34
Fig. 32.– Expérience du Cube d'Allègre. Représentation du nombre de cubes de volume V	34
Fig. 33.– Illustration du critère de fragilité dans le modèle du pilier sain [Allegre <i>et al.</i> , 1982]	35
Fig. 34.– Les 22 configurations topologiques différentes dans les modèles du pilier sain [Allegre, 1982] et du plan de fragilité [Turcotte, 1986]	35
Fig. 35.– Modèle du pilier sain (d'après Allegre [1982]). Graphe de l'application de premier retour	37
Fig. 36.– Modèle du plan de fragilité (d'après Turcotte [1986]). Graphe de l'application de premier retour	37
Fig. 37.– Joints sur une surface de banc de grès, Whinney Hill Quarry, Lancashire, Grande-Bretagne [Gillespie <i>et al.</i> , 1993]	38
Fig. 38.– Surfaces structurales dans un réseau de joints, tufs miocènes de Yucca Mountain, Nevada, Etats-Unis [Barton, 1995]	39
Fig. 39.– Réseau de joints dans les grès permien de Morison, Connecticut, Etats-Unis, à différentes échelles [Barton, 1995]	40
Fig. 40.– Schéma de l'extension d'une fracture	41
Fig. 41.– Génération d'une surface fermée concave limitée par des segments linéaires	41
Fig. 42.– Conception du programme OBSIFRAC : Modèle statique objet selon la méthode OMT [Rumbaugh, 1995]	45

Fig. 43.– Schéma du découpage d'un bloc par une fracture	47
Fig. 44.– Blocs produits par le découpage d'un bloc complexe. Représentation schématique en deux dimensions	47
Fig. 45.– Implémentation de la base de données OBSIFRAC. Modèle relationnel	47
Fig. 46.– Illustration en 2D de la notion de stade	49
Fig. 47.– Principe de la projection de Schmidt	49
Fig. 48.– Principe de choix aléatoire d'un bloc pondéré par son volume	51
Fig. 49.– Illustration en deux dimensions de la caractérisation d'un bloc en demi-espaces	52
Fig. 50.– Arborescence de découpage de blocs. Illustration de l'algorithme de recherche des blocs élémentaires constitutifs	53
Fig. 51.– Exemple de découpage d'un bloc complexe	54
Fig. 52.– Exemple de découpage des blocs dans les cas A et B	56
Fig. 53.– Schéma de principe du processus de découpage de type C, indiquant le nombre de blocs générés	56
Fig. 54.– Exemple de découpage des blocs dans le scénario C, dans le cas où le nombre initial de blocs est $N_0=5$, et la probabilité qu'un bloc quelconque soit fragile est $p=3/5$	57
Fig. 55.– Schéma de principe du processus de découpage de type D, indiquant le nombre de blocs générés	57
Fig. 56.– Exemple de découpage dans le scénario D. Nombre initial de blocs $N_0=5$. Probabilité de fragilité $p=3/5$	58
Fig. 57.– Récapitulatif des processus de découpage employés	59
Fig. 58.– Représentation en deux dimensions de la notion de « distance interfracturale minimale » Δ_F	59
Fig. 59.– Nombre maximal de fractures en fonction de la valeur Δ_F , pour les scénarios A (trait plein) et B (pointillé)	59
Fig. 60.– Scénario B. Coupes dans le modèle. 1000, 5000, 10000, 50000, 100000, 150000 fractures. Distance interfracturale minimale $\Delta_F=0$	60
Fig. 61.– Scénario de découpage B. Coupes dans le modèle pour 1000 fractures générées. Distances interfracturales minimales $\Delta_F=0$, $\Delta_F=1,5$ et $\Delta_F=2$	61
Fig. 62.– Scénario de découpage B. Coupes dans le modèle pour 5000, 10 000, et 21 795 fractures. Distance interfracturale minimale $\Delta_F=0,5$	62
Fig. 63.– Scénario A. Coupes dans le modèle. 1000, 5000, 10000, 50000, 100000 et 150000 fractures. Distance interfracturale minimale $\Delta_F=0$	63
Fig. 64.– Scénario de découpage A. Coupes dans le modèle, pour 5000, 10 000, et 23 103 fractures. Distance interfracturale minimale $\Delta_F=0,5$	64
Fig. 65.– Scénario de découpage C. Probabilité de division d'un bloc $p=0,6$. Coupes dans le modèle après 5, 10, 20 et 30 salves (71841 blocs)	65
Fig. 66.– Scénario de découpage C. Simulations réalisées avec les probabilités : $p=0,5$, $p=0,6$, $p=0,7$, $p=0,8$, à partir d'une base initiale de 101 blocs élémentaires. Coupes dans le modèle après 10 salves	66
Fig. 67.– Scénario de découpage D. Coupes dans le modèle pour une probabilité $p=0,6$ à partir d'un état initial de 9 blocs	67
Fig. 68.– Valeurs de la moyenne \bar{V} , de l'écart-type σ et de la dispersion C_V dans la distribution des volumes pour les 4 scénarios de fragmentation de la figure 69	70
Fig. 69.– Forme comparée des distributions des volumes dans le modèle pour les 4 types de scénarios	70
Fig. 70.– Tableau récapitulatif des simulations de type A référencées dans le texte et les figures	71
Fig. 71.– Tableau récapitulatif des simulations de type B référencées dans le texte et les figures	71
Fig. 72.– Tableau récapitulatif des simulations de type C référencées dans le texte et les figures	72
Fig. 73.– Tableau récapitulatif des simulations de type D référencées dans le texte et les figures	72
Fig. 74.– Scénario B, distance interfracturale minimale nulle. Diagrammes Q-Q et P-P pour la distribution des volumes des blocs, avec un ajustement sur une loi lognormale	73
Fig. 75.– Scénario B, distance interfracturale minimale nulle. Diagramme Q-Q et P-P de la distribution des volumes des blocs, pour un ajustement sur une loi Beta	74
Fig. 76.– Ajustement de la distribution des volumes dans le processus A par une loi lognormale. Diagramme Q-Q	75
Fig. 77.– Tentative d'ajustement de la distribution des volumes dans le processus A par une loi lognormale. Diagramme P-P	75
Fig. 78.– Tentative d'ajustement de la distribution des volumes dans le processus A par une loi bêta. Diagramme Q-Q	76
Fig. 79.– Tentative d'ajustement de la distribution des volumes dans le processus A par une loi bêta. Diagramme P-P	76
Fig. 80.– Ajustement de la distribution des volumes dans le processus A sur une loi de Weibull. Diagramme Q-Q	77
Fig. 81.– Ajustement de la distribution des volumes dans le processus A sur une loi de Weibull. Diagramme P-P	77
Fig. 82.– Scénario A. Distribution des volumes de blocs ; et fonction de Weibull utilisée pour l'ajustement	78
Fig. 83.– Diagramme Q-Q de la distribution des volumes, pour un ajustement sur une loi lognormale. Scénario C	78
Fig. 84.– Diagramme Q-Q de la distribution des volumes, pour un ajustement sur une loi Beta. Scénario C	79
Fig. 85.– Diagramme Q-Q de la distribution des volumes, pour un ajustement sur une loi lognormale. Scénario D	79
Fig. 86.– Scénario B. Distribution des volumes des blocs à différents stades d'évolution du modèle	80

Fig. 87.– Scénario D. Distribution des volumes des blocs élémentaires à différents stades d'évolution du modèle	81
Fig. 88.– Scénario A. Distribution des volumes des blocs élémentaires à différents stades d'évolution du modèle	81
Fig. 89.– Scénario C. Distribution des volumes des blocs élémentaires à différents stades d'évolution du modèle	82
Fig. 90.– Processus C. Probabilité 0,6. Distribution de la dimension linéaire R	83
Fig. 91.– Volumes minimaux et maximaux des blocs obtenus à saturation dans les processus A et B, pour des valeurs variables de la distance interfracturale	83
Fig. 93.– Illustration en 2D du résultat obtenu ci-dessus. Cas d'un bloc produit par l'imposition d'une distance interfracturale minimale	83
Fig. 92.– Valeurs du diamètre de la sphère de même volume que le bloc minimal, permettant d'estimer la sphéricité des blocs, pour différentes valeurs de la distance interfracturale	84
Fig. 94.– Scénario B. Influence de la distance interfracturale minimale sur la distribution des volumes, pour 1000 fractures	84
Fig. 95.– Scénario A. Influence de la distance interfracturale minimale sur la distribution des volumes, pour 1000 fractures	85
Fig. 97.– Processus A. Distribution de la racine cubique du volume. Distance interfracturale minimale de 0,5	85
Fig. 96.– Scénario A. Distribution des volumes pour une distance interfracturale de 0,1 et 0,5	86
Fig. 98.– Scénario D. Distribution des volumes des blocs pour 15 salves de fractures et différentes probabilités	87
Fig. 99.– Comparaison des dimensions fractales théoriques D_t et expérimentales D_e obtenues dans le scénario de découpage C	88
Fig. 100.– Scénario C. Distribution des volumes des blocs, pour une probabilité variable supérieure ou égale à 0,5	88
Fig. 101.– Scénario C. Distribution des volumes des blocs, pour une probabilité variable inférieure à 0,5	89
Fig. 102.– Valeurs de la moyenne, de l'écart-type et du coefficient de dispersion pour la distribution des longueurs de traces dans les 4 processus correspondant à la figure 103	90
Fig. 103.– Exemple de distributions de la longueur des traces dans les 4 processus	90
Fig. 104.– Distribution des longueurs de trace dans le découpage B pour $\Delta_F = 0$. Ajustement lognormal	91
Fig. 105.– Scénario B. Longueur des traces pour un nombre variable de fractures, et pour $\Delta_F = 0,1$	91
Fig. 106.– Processus B. Effet de la variation de la distance interfracturale sur la distribution des longueurs de traces	92
Fig. 107.– Approximation de la distribution des longueurs de trace dans le processus A par une loi de Weibull. Distance interfracturale minimale nulle	92
Fig. 108.– Processus A. Distribution des volumes pour un nombre de fractures croissant, et pour une distance interfracturale minimale d de 0, 0,1 et 0,5	93
Fig. 109.– Ajustement des longueurs de trace produites par le processus C par une loi bêta pour $L > 3$. Probabilité $p=0,6$	94
Fig. 110.– Distribution des longueurs de traces dans le processus C, pour diverses valeurs de nombre de blocs et une probabilité de fragmentation $p=0,6$	94
Fig. 111.– Distribution des longueurs de traces dans le processus C, pour diverses valeurs de la probabilité de fragmentation	95
Fig. 112.– Ajustement lognormal de la distribution des longueurs de traces dans le processus de découpage D. Probabilité $p=0,6$	95
Fig. 113.– Scénario D. Evolution de la distribution des longueurs de traces avec le nombre de salves, pour une probabilité $p=0,6$	96
Fig. 114.– Pour les 4 types de découpage : Nombre de traces de longueur la plus probable, relation nombre de traces en section / la longueur la plus probable et relation nombre de traces en section / nombre de fractures du modèle	97
Fig. 115.– Processus C. Longueur la plus probable des traces en section, en fonction de la probabilité de fragmentation	98
Fig. 116.– Valeurs des exposants a , b , c des lois puissance dans l'étude des longueurs de traces pour les différents processus de découpage	98
Fig. 117.– Carte géologique structurale simplifiée du fossé rhénan	101
Fig. 118.– Coupe interprétative du profil ECORS (d'après Brun <i>et al.</i> [1991])	101
Fig. 119.– Coupe géologique passant par le forage géothermique GPK1	102
Fig. 120.– Gradient géothermique et modèle de circulation des fluides dans le fossé rhénan	102
Fig. 121.– Profils thermiques dans les puits de Soultz-sous-Forêts [Garnish <i>et al.</i> , 1994]	103
Fig. 122.– Schéma de principe de l'exploitation géothermique HDR de Soultz-sous-Forêts	103
Fig. 123.– Situation géographique des forages géothermiques profonds de Soultz-sous-Forêts	105
Fig. 124.– Répartition des microséismes induits, révélant la fracturation hydraulique dans chacun des puits GPK1 et GPK2	106
Fig. 125.– Modèle stochastique d'un réseau de fractures sur le réservoir géothermique du site HDR japonais de Hijori	106
Fig. 126.– Zones fracturées à Soultz-sous-Forêts [Genter <i>et al.</i> , 1998]	108
Fig. 127.– Lithofaciès d'une zone fracturée et hydrothermalisée et densité de fractures correspondante	109
Fig. 128.– Fractures préexistantes observées sur les carottes du puits EPS1 [Dezayes, 1995]	110
Fig. 129.– Fractures de relaxation observées sur les carottes du puits EPS1 [Dezayes, 1995]	111
Fig. 130.– Orientations comparées des mésofractures préexistantes et des principales familles de traînées d'inclusions fluides relevées dans le puits EPS1 [Dezayes, 1995]	112
Fig. 131.– Distribution cumulée de l'épaisseur des fractures dans le puits EPS1 (d'après Genter <i>et al.</i> [1998])	112

Fig. 132.– Répartition verticale des fractures relevées sur carottes dans le puits EPS1	113
Fig. 133.– Répartition verticale des fractures dans les puits GPK1 et GPK2 [Genter <i>et al.</i> , 1998]	114
Fig. 134.– Distributions cumulées comparées de l'espacement des fractures à partir de l'observation sur carottes dans EPS1, et d'imagerie diagraphique dans GPK1 [Genter <i>et al.</i> , 1998]	115
Fig. 135.– Modèle géométrique des zones fracturées à Soultz par le programme 3DEC [Genter <i>et al.</i> , 1998]	115
Fig. 136.– Liste des 146 fractures du puits EPS1, entre les profondeurs -1850 m et -1900 m, prises en compte dans le modèle	117
Fig. 137.– Volume de modélisation cubique autour du puits EPS1	118
Fig. 138.– Répartition des 146 fractures dans le puits EPS1 entre -1850 m et -1900 m	118
Fig. 139.– Loi d'orientation des 146 fractures dans le puits EPS1 entre -1850 m et -1900 m	118
Fig. 140.– Fracturation observée sur les carottes du puits EPS1 (d'après [Dezayes, 1995]. Pôles de fractures et diagrammes d'isodensité des failles et fractures préexistantes	119
Fig. 141.– Schéma de principe illustrant le problème de continuité entre fractures imposées, déterministes, relevées par forage et fractures « périphériques », stochastiques, dans l'enceinte du modèle	120
Fig. 142.– Illustration de la contrainte imposée lors du tirage du plan d'une fracture locale dans le but de couper le bloc B	121
Fig. 143.– Deux exemples de l'effet de la « contrainte de segment vide »	121
Fig. 144.– Simulation de 70 000 fractures dans un volume de 50x50x50 mètres, autour du puits EPS1 pour des profondeurs entre -1850 et -1900 m. Coupe verticale W-E passant par le puits. Scénario « Fractures imposées finales »	122
Fig. 145.– Simulation de 120 000 fractures dans un volume de 50x50x50 mètres, autour du puits EPS1 pour des profondeurs entre -1850 et -1900 m. Scénario « Fractures imposées initiales ». Coupe verticale W-E passant par le puits	123
Fig. 146.– Illustration de l'inefficacité des simulations de type B pour rendre compte des fractures imposées	125
Fig. 147.– Simulations de type A réalisées dans un bloc cubique de 50m d'arête, traversé verticalement en son centre par le puits EPS1 entre -1850 et -1900m. Coupe verticale W-E passant par le puits, 30000 fractures et 105000 fractures	126
Fig. 148.– Schéma de principe résultant de la mise en œuvre des processus B	127
Fig. 149.– Détail de la figure 148 montrant les deux phases de réalisation de fractures	127
Fig. 150.– Valeurs de la densité volumique des fractures pour les simulations de la figure 151	128
Fig. 151.– Simulation à petite échelle dans un modèle parallélépipédique de $L=1=5\text{m}$, et $h=50\text{m}$. Coupes verticales passant par le puits EPS1 (-1850-1900m), pour des nombres de fractures variables indiqués	129
Fig. 152.– Simulation de 360 000 fractures dans un volume cubique de 50x50x50 m traversé axialement par le puits EPS1, entre -1850m et -1900m	130
Fig. 153.– Simulation comportant 360 000 fractures non recoupantes dans un volume de 50x50x50 mètres, autour du puits EPS1 pour des profondeurs entre -1850 et -1900 m. Coupe verticale W-E passant par le puits	131
Fig. 154.– a) Emplacement des puits fictifs dans le modèle et diagrammes des pôles des plans de fractures recoupés par les puits fictifs	132
Fig. 155.– Diagrammes de distances interfractionnelles sur 25 profils verticaux, de coordonnées (X,Y) indiquées	133
Fig. 156.– Zones hydrothermalisées du puits EPS1 (d'après Genter [1995])	134
Fig. 157.– Représentation des 12 zones hydrothermalisées du puits EPS1 entre -1430 et -2230 m de profondeur	135
Fig. 158.– Simulation réalisée dans un volume de 200m (X) x 200m (Y) x 800m (Z) autour du puits EPS1, prenant en compte les seules fractures du puits. Tirage des fractures pondéré par l'épaisseur	136
Fig. 159.– Simulation réalisée dans un volume de 200m (X) x 200m (Y) x 800m (Z) autour du puits EPS1, prenant en compte les seules fractures du puits. Tirage des fractures pondéré par la densité linéaire des amas de fractures relevés sur carottes	136
Fig. 160.– Nombre de blocs recoupés par les fractures d'épaisseur E, dans la simulation de la figure 161	137
Fig. 161.– Simulation réalisée dans un volume de 200m (X) x 200m (Y) x 800m (Z) autour du puits EPS1, prenant en compte les seules fractures du puits. Zones fracturées de Genter [1995] matérialisées dans le modèle par des plans recoupant d'autant plus de blocs que la fracture est épaisse (fig. 160)	137
Fig. 162.– Illustration en 2 dimensions du problème de corrélation des fractures entre 2 puits	138
Fig. 163.– Nombre d'éléments produits dans la base de données pour une simulation autour du puits EPS1	139
Fig. 164.– Nombre d'entités de liaison produits dans la base de données dans une simulation autour du puits EPS1	139
Fig. 165.– Deux exemples de blocs « infini » et fini	141
Fig. 166.– Deux exemples de blocs finis	141
Fig. 167.– Les 3 catégories de blocs libres : Bloc stable, Bloc clé potentiel et Bloc clé réel	141
Fig. 168.– Définition du demi-espace supérieur d'un plan	142
Fig. 169.– Représentation en 2D d'un système de plans limitant des demi-espaces	142
Fig. 170.– Illustration de la notion de pyramide de joint et de pyramide du bloc, et application du théorème de finitude	143
Fig. 171.– Illustration en 2D du théorème de Shi sur la « dégageabilité » du bloc	143
Fig. 172.– Exemples 2D de blocs dont la pyramide de joints présente une, deux ou plus de deux paires de faces parallèles	144

Fig. 173.– Les forces agissant sur un bloc à l'équilibre	145
Fig. 174.– Mouvement de basculement naturel d'un bloc	145
Fig. 175.– Exemple de glissement d'un bloc dans une gouttière formée par 3 faces	145
Fig. 176.– Dégagement d'un bloc libre par décollement	146
Fig. 177.– Glissement d'un bloc sur une de ses faces	146
Fig. 178.– Illustration en 2D de la condition de glissement du bloc sur une seule de ses faces	147
Fig. 179.– Glissement d'un bloc sur deux faces	147
Fig. 180.– Détermination de la direction de glissement effective d'un bloc	147
Fig. 181.– Illustration du premier code de calcul : application en 2D du théorème de Shi sur la « dégageabilité » des blocs	149
Fig. 182.– Sur un exemple 2D, notation des plans des faces d'un bloc selon leur position par rapport au barycentre du bloc	150
Fig. 183.– Exploration discrète de l'espace 3D par des points M définis en coordonnées sphériques	150
Fig. 184.– Illustration des deux cas de dégagement des blocs	150
Fig. 185.– Vecteur unitaire déplacement du bloc, et caractérisation pour les quatre modes possibles de déplacement d'un bloc soumis à son seul poids	151
Fig. 186.– Quelques valeurs du coefficient de friction m et de l'angle de friction F pour diverses roches. D'après Jaeger & Cook [1969]	152
Fig. 187.– Valeur de la force F entraînant un bloc de poids unitaire en glissement sur un seul plan d'inclinaison b , pour diverses valeurs de l'angle de friction F	153
Fig. 188.– Organigramme simplifié de l'algorithme d'évacuation des blocs libres	154
Fig. 189.– Rôle de l'orientation des fractures dans le risque de glissement des blocs : cas où la direction du plan de la paroi est parallèle à la direction dominante des plans de fractures	155
Fig. 190.– Simulation d'éboulement des figures 191 et 192	156
Fig. 191.– Simulation d'éboulement réalisée sur un bloc rocheux parcouru par une fracturation d'orientation E-W, d'inclinaison dominante de secteur Nord	156
Fig. 192.– Vue de face de l'escarpement, vers le Nord	157
Fig. 193.– Simulation d'éboulement réalisée sur un bloc rocheux parcouru par une fracturation d'orientation E-W, d'inclinaison dominante de secteur Sud	157
Fig. 194.– Diagramme séquentiel d'un éboulement simulé dans une configuration d'escarpement de stabilité minimale	157
Fig. 195.– Simulation d'éboulement dans un bloc cubique parcouru par 1848 fractures à pendage incliné vers le vide, et dont la face Sud et la face supérieure sont à l'air libre	158
Fig. 196.– Simulation d'éboulement sur un escarpement dans une configuration de stabilité minimale. Distribution cumulée en coordonnées bilogarithmiques des volumes des blocs éboulés selon les trois processus d'évacuation	159
Fig. 197.– Illustration en 2D du mécanisme de vidange des petits blocs	159
Fig. 198.– Trois exemples d'éboulements sur des volumes cubiques affectés par une fracturation homogène de type « A ». Fractures non recoupantes	160
Fig. 199.– Nombres progressifs de blocs libérés dans l'éboulement d'escarpements, dans le cas de fracturation aléatoire non recoupantes de type « A »	161
Fig. 201.– Simulation EB8. Coupes verticales à travers le modèle à un stade d'avancement du processus d'éboulement.	162
Fig. 200.– Simulation EB8. Cube d'arête 50 unités, 1829 fractures, dont 904 recoupantes	162
Fig. 202.– Simulation EB8. 5000 fractures recoupantes de type B. Evolution du processus d'éboulement à un stade avancé et au stade terminal stable (Coupes normales à OX)	163
Fig. 203.– Nombres de blocs et volumes évacués dans 2 simulations d'éboulements réalisées à partir de volumes cubiques de 5000 blocs. Découpage de type A. EB6 = fractures non recoupantes et EB8 = fractures recoupantes	163
Fig. 204.– Simulation EB8 (5000 blocs, 1829 fractures recoupantes de type B). Nombre de blocs libérés par les 3 mécanismes au cours de l'éboulement au stade d'avancement représenté figure 201	164
Fig. 205.– Diagramme de 2 séquences d'éboulements sur un volume cubique de 5000 blocs. Type de découpage A. Fractures non recoupantes et recoupantes	164
Fig. 206.– Volumes évacués au cours d'éboulements. Type de découpage A, 5000 blocs	165
Fig. 207.– Diagramme de l'éboulement EB8 (5000 blocs, type de découpage A, fractures recoupantes)	166
Fig. 208.– Simulation EB7 (fractures non recoupantes de type B). Nombre de blocs libérés par les 3 mécanismes au cours de l'éboulement	166
Fig. 209.– Nombres de blocs et volumes des blocs évacués dans une simulation d'éboulement réalisée dans un découpage de type B : 5000 blocs, fractures non recoupantes	167
Fig. 210.– Eboulement EB7 : découpage de type B, 5000 fractures non recoupantes. Diagramme séquentiel et volumes cumulés évacués	167

Fig. 211.— Nombres de blocs et volumes des blocs évacués dans une simulation d'éboulement réalisée dans un découpage de type B	168
Fig. 212.— Simulation EB9 : 2572 blocs, 78 fractures de type B dont 65 recoupantes. Nombre de blocs libérés par les 3 mécanismes au cours de l'éboulement	168
Fig. 213.— Eboulement EB9 : découpage de type B, 2572 blocs, 78 fractures dont 65 recoupantes. Diagramme séquentiel et volumes évacués cumulés	169

TABLE DES MATIÈRES

Résumé	3
Abstract	4
Avant-propos	5
 INTRODUCTION	 7
1.– Le problème posé : Modéliser la fracturation	7
2.– Les objectifs : Un SGBD « 3D » et multiscalaire pour la fracturation	8
3.– La démarche : Plan du mémoire	8
4.– Contributions, résultats obtenus et perspectives	9
 PREMIÈRE PARTIE - MODÉLISER LA FRACTURATION	 10
1.– Limites de l'analyse structurale classique et intérêt de la modélisation	10
1.1. Les difficultés rencontrées	10
1.2. L'apport d'une modélisation	11
2.– Inventaire et typologie des modèles de fracturation	11
2.1. Les modèles « équivalents » pour la modélisation des écoulements dans un milieu fracturé	12
2.1.1. Le modèle à milieu unique	12
2.1.2. Le modèle à plusieurs milieux : le modèle « à double porosité »	14
2.2. Les modèles « descriptifs »	14
2.2.1. La description du géologue structuraliste	15
2.2.2. Fractures infinies et fractures parallèles	15
2.2.3. L'apport de la géostatistique	15
2.2.4. L'approche stochastique	17
3.– Caractérisation géométrique fractale des milieux fracturés	20
3.1. Bref historique	20
3.2. Approche empirique de la dimension fractale	20
3.3. Approche pratique de la dimension fractale	22
3.3.1. Méthode du recouvrement minimal	22
3.3.2. Méthode du comptage de boîtes	23
3.3.3. Méthode de la poussière de Cantor	27
3.4. Multifractals - Principaux résultats	28
4.– Géométrie fractale et modélisation de la fragmentation	30
4.1. Fractals et modélisation de la fragmentation	30
4.2. Résultats expérimentaux et lois de distribution	30
4.3. Le modèle de fragmentation de Sammis <i>et al.</i> [1987]	32
4.4. Le modèle de fragmentation du « cube d'Allègre »	33
4.5. Les modèles du « pilier sain » et du « plan de fragilité »	34
5.– Assemblage multiscalaire de blocs : résultat ultime du processus de fracturation	36
5.1. Observation de quelques réseaux en coupes	36
5.2. Instabilité des terminaisons libres	38
6.– Conclusion	41

SECONDE PARTIE - DESCRIPTION ET EXPLORATION THÉORIQUE DU MODÈLE	43
1.– Description du modèle OBSIFRAC	43
1.1. Description statique	43
1.1.1. Conception et implémentation du modèle OBSIFRAC	43
1.1.1.1. Conception « objet » par la méthode OMT	43
1.1.1.2. Réalisation « objet » avec le C++	44
1.1.1.3. Implémentation relationnelle avec Microsoft Jet	44
1.1.2. Les entités	46
1.1.2.1. Le « germe »	46
1.1.2.2. La fracture et le bloc	46
1.1.2.3. La face, l'arête, le noeud	48
1.1.2.4. Schéma relationnel de la base de données	48
1.2. La dynamique du modèle	48
1.2.1. Notion de stade	48
1.2.2. Choix du type de fracture	48
1.2.2.1. Source de fractures « régionales » : la matrice régionale	48
1.2.2.2. Source de fractures imposées : la table FRACTURES FORCEES	50
1.2.2.3. Protocole de choix du type	50
1.2.3. Choix du bloc à couper	51
1.2.4. Construction élémentaire d'une fracture	51
1.2.4.1. Caractérisation d'un bloc en demi-espaces [Goodman et Shi, 1985]	51
1.2.4.2. Choix du germe	52
1.2.4.3. Définition complète du plan de fracture	52
1.2.5. Division du bloc	53
1.2.5.1. Lecture du bloc et de ses composants	53
1.2.5.2. Processus de division	53
2.– Exploration théorique du modèle	54
2.1. Paramètres retenus	55
2.1.1. Processus de découpage	55
2.1.1.1. Scénario de type B : Germe aléatoire dans le modèle	55
2.1.1.2. Scénario de type A : Germe aléatoire dans un bloc aléatoire	55
2.1.1.3. Scénario de type C : Salves sans remise	56
2.1.1.4. Scénario de type D : Salves avec remise	57
2.1.2. Distance minimale germe-fractures	58
2.2. Caractérisation typologique descriptive	58
2.2.1. Caractérisation des réseaux en coupe	58
2.2.1.1. Scénario B	58
2.2.1.2. Scénario A	62
2.2.1.3. Scénario C	64
2.2.1.4. Scénario D	64
2.3. Lois statistiques observées	65
2.3.1. Lois statistiques de distribution d'un paramètre	65
2.3.1.1. Distributions testées	65
2.3.1.2. Ajustement	68
2.3.2. Lois relevées en 3D : volumes des blocs	69
2.3.2.1. Caractérisation des types de processus de fragmentation	69
2.3.2.2. Evolution de la loi de distribution des volumes avec le mécanisme de génération des fractures	80
2.3.2.3. Scénarios A et B : influence de la distance interfracturale minimale	82
2.3.2.4. Scénarios C et D : influence de la probabilité de division d'un bloc	87
2.3.2.5. Conclusion	89
2.3.3. Lois relevées sur les sections 2D : longueurs de traces de fractures	89
2.3.3.1. Caractérisation des distributions de longueurs de traces	90
2.3.3.2. Détermination pratique du nombre de fractures dans le modèle	96
2.3.3.3. Conclusion	98
3.– Conclusion	99

TROISIÈME PARTIE - CHAPITRE 1**CONTRAINTE DE POSITION DES FRACTURES :****APPLICATION AUX DONNÉES DU SITE GÉOTHERMIQUE DE SOULTZ-SOUS-FORÊTS 100**

1.– Le site géothermique de Soultz-sous-Forêts	100
1.1. Géologie régionale	100
1.2. Contexte local	100
1.3. L'anomalie géothermique	100
2.– La géothermie HDR et son application au site de Soultz-sous-Forêts	103
2.1. Principe de la géothermie HDR	103
2.2. Les travaux d'ingénierie	104
2.3. Nécessité d'un modèle tridimensionnel de fracturation	104
3.– Les données recueillies sur la fracturation	107
3.1. Méthodes utilisées	107
3.1.1. Observation directe et diagraphies classiques	107
3.1.2. Imagerie acoustique	107
3.1.3. Imagerie électrique	107
3.1.4. Inclusions fluides	107
3.2. Résultats	107
3.2.1. Typologie des fractures	107
3.2.1.1. Fracturation à grande échelle	107
3.2.1.2. Zones fracturées	107
3.2.1.3. Mésofracturation ou fracturation à petite échelle	108
3.2.1.4. La microfracturation	109
3.2.2. Épaisseur des fractures	109
3.2.3. Densité des fractures	113
3.2.4. Orientation des fractures	113
3.2.5. Espacement des fractures	113
3.3. Les bases de notre modèle	114
3.3.1. Réalisation d'un découpage multiscalaire	114
3.3.2. Choix des données pour le modèle	116
3.3.3. Orientation des discontinuités	116
4.– Élaboration pratique de modèles applicables au cas de Soultz	118
4.1. Problématique	118
4.2. Réalisation de la coïncidence géométrique entre fractures imposées et fractures “ périphériques ” : la contrainte de puits	119
4.2.1. Le problème et ses deux solutions	119
4.2.2. Artefact géométrique de la procédure mixte : l'effet couloir	120
4.2.3. Impact de la chronologie relative des deux types de fractures sur l'effet couloir	121
4.2.4. Impact du type de génération	122
4.2.4.1. Générations à processus unique	123
4.2.4.2. Générations à processus combinés	124
4.2.5. Détermination du nombre de fractures à créer dans un volume donné	124
4.2.6. Obtention d'un modèle valide	128
4.2.7. Distances interfractionnelles	131
4.3. Réflexions sur le problème de la chronologie des fractures	134
4.3.1. Ordre de génération et épaisseur des fractures	134
4.3.2. Ordre de génération et densité des amas	135
4.3.3. Utilisation des fractures recoupantes	137
4.3.4. Problème de la corrélation inter-puits dans le cas de Soultz	138
5.– Conclusion	138

TROISIÈME PARTIE - CHAPITRE 2

ÉTUDE DE LA STABILITÉ D'UN SYSTÈME DE BLOCS	140
1.– Problématique : la rupture d'équilibre dans le phénomène d'éboulement	140
2.– Étude de la stabilité par la Théorie des Blocs : fondement et mise en oeuvre	140
2.1. Les hypothèses de la théorie des blocs	140
2.2. Les fondements de la Théorie des Blocs [Goodman & Shi, 1985]	141
2.2.1. Classification des blocs en fonction de leur stabilité	141
2.2.2. Demi-espaces et pyramides	142
2.2.3. Caractérisation des blocs finis	142
2.2.4. Caractérisation des blocs libres	144
2.2.5. Les forces agissant sur un bloc libre	144
2.2.6. Les modes de dégagement d'un bloc libre	145
2.2.6.1. Décollement	146
2.2.6.2. Glissement sur une face	146
2.2.6.3. Glissement sur deux faces	147
2.3. Mise en œuvre pratique dans notre modèle : le code de calcul EBOUL3D	147
2.3.1. Application du théorème de « dégageabilité »	148
2.3.1.1. Description fonctionnelle de l'algorithme	148
2.3.1.2. Caractérisation géométrique de la pyramide des joints	148
2.3.1.3. Mécanisme de libération des blocs	150
2.3.2. Hypothèses complémentaires	151
2.3.2.1. Action exclusive de la gravité	151
2.3.2.2. Modélisation de la friction	152
2.3.3. Simulation du mécanisme de l'éboulement	153
2.3.3.1. Forces de glissement	153
2.3.3.2. Description fonctionnelle de l'algorithme	154
3.– Applications	155
3.1. Effet de l'attitude des plans de fractures	155
3.1.1. Cas limites de stabilité des blocs affleurants	155
3.1.1.1. Edifice à stabilité maximale	156
3.1.1.2. Edifice à stabilité minimale	156
3.1.2. Attitudes aléatoires des plans de fractures	160
3.2. Effet du caractère recoupant des fractures	162
3.3. Rôle du type de découpage	166
3.4. Conclusion	168
CONCLUSIONS GÉNÉRALES	170
Remerciements	173
Bibliographie	174
Liste des figures	178
Table des matières	184

GÉOLOGIE ALPINE

MÉMOIRE H.S.

T. 1	MARTIN (S). 1960. - Les pécoptéridées du Bassin houiller de la Mure (Isère). Leur signification stratigraphique. 126 p.	30 F 4,57 €
T. 2	SARROT-REYNAULD (J). 1961. - Etude géologique du Dôme de la Mure (Isère) et des régions annexes. T 1 : Le socle cristallin de la couverture paléozoïque. 215 p. Thèse d'Etat. Grenoble I.	30 F 4,57 €
T. 4	VIALON (P). 1966. - Etude géologique du Massif cristallin Dora-Maira, Alpes cottiennes internes (Italie). 282 p. Thèse d'Etat. Grenoble I.	30 F 4,57 €
T. 5	CHEYLAN (G). 1966. - Etudes géologiques des aménagements hydrauliques de la compagnie du Bas-Rhône-Languedoc. 343 p. Thèse d'Etat. Grenoble I.	30 F 4,57 €
T. 6	RADELLI (L). 1967. - Géologie des Andes Colombiennes. 457 p. Thèse d'Etat. Grenoble. I.	épuisé
T. 7	SCHNEIDER (B). 1967. - Contribution à l'étude des massifs de fondation de barrages. 242 p. Thèse de Docteur Ingénieur Grenoble I.	30 F 4,57 €
T. 8	COLLOQUE sur l'hydrogéologie karstique du Massif du Vercors. Grenoble le 16 Novembre 1968. Tome I (100 p.) et II (p 101 à 186).	t.I épuisé t. II 10 F
T. 9	ANTOINE (P). 1971. - La zone des brèches de Tarentaise entre Bourg-Saint-Maurice (Vallée de l'Isère) et la frontière Italo-Suisse. 367 p. Thèse d'Etat. Grenoble I.	30 F 4,57 €
T.10	GIRAULT (J). 1976. - Méthodes d'étude des cristaux transparents par immersion. 86 p.	30 F 3,05 €
T.11	ARNAUD-VANNEAU. 1980. - Micropaléontologie, paléoécologie et sédimentologie d'une plate-forme carbonatée de la marge passive de la Téthys : L'Urgonien du Vercors septentrional et de la Chartreuse (Alpes occidentales). Volumes 1 (267 p.), 2 (269 à 874) et 3 (19 p. + 113 pl.). Thèse d'Etat Grenoble I.	épuisé
T.12	ARNAUD (H). 1981. - De la plate-forme urgonienne au bassin vocontien. Le barrémo-bédoulien des Alpes occidentales entre Isère et Buëch. Vol 1 (311 p.), 2 (314 à 804) et 3 (19 p. + 115 pl.). Thèse d'Etat Grenoble I.	épuisé
T.13	COLLOQUE A.G.S.E. "Le détritisme dans le S.E de la France". Grenoble, 11 et 12 Décembre 1986. Institut Dolomieu. Volume 1. 469 p.	150 F 22,87 €
T.14	COLLOQUE A.G.S.E. "Le détritisme dans le S.E de la France". Grenoble, 10 et 11 Décembre 1987. Institut Dolomieu. Volume 2. 305 p.	150 F 22,87 €
T.15	COLLOQUE A.G.S.E. "Risques naturels dans le S.E de la France". Avignon, 19 et 20 Octobre 1989. 251 p.	100 F 15,24 €
T.16	6ième COLLOQUE HIMALAYA-KARAKORUM-TIBET. Auris-en-Oisans, 20-23 Mars 1991. 97 p. ..	épuisé
T.17	COLLOQUE INTERNATIONAL sur les événements de la limite Cénomanien-Turonien. Grenoble, 24-26 Mai 1991. 129 p.	épuisé
T.18	COLLOQUE A.G.S.E. " Enregistrement de l'Eustatisme sur les marges Ouest-Tethysiennes au Mésozoïque". Lyon, 23 et 24 Novembre 1989. 136 p.	épuisé
T.19	GUILLOT (S). 1993. - Le granite de Manaslu (Népal central). Marqueur de la subduction et de l'extension intracontinentales himalayennes. Etude structurale, métamorphique et géochimique. 97 p. + annexes. Thèse d'Université. Grenoble I.	épuisé
T.20	Lower Cretaceous cephalopod biostratigraphy of the western Tethys : Recent developments, regional synthesis and outstanding problems. IGCP 262 : Tethyan Cretaceous Correlations. Lower Cretaceous Cephalopod Team. 1994. 320 p.	30 F 68,60 €
T.21	DARMENDRAIL (X). 1994. - Déformation récente et actuelle des Alpes occidentales. Mise en évidence, caractérisation et quantification par analyse géomorphologique et comparaison des mouvements. 174 p. Thèse d'Université. Chambéry	non publié
T.22	JOUANNE F. 1994. - Mesure de la déformation actuelle des Alpes occidentales et du Jura par comparaison des données géodésiques historiques. Thèse de l'Université de Savoie. 153 p.	150 F 22,87 €
T.23	CHALARON (E). 1994. - Modélisation numérique et signature géologique des interactions entre tectonique, érosion et sédimentation dans l'avant-pays Himalayen. 134 p. Thèse d'Université. Grenoble I.	épuisé
T.24	BLANC-ALÉTRU (M.-C.). 1995 - Importance des discontinuités dans l'enregistrement sédimentaire de l'Urgonien jurassien. Micropaléontologie, sédimentologie, minéralogie et stratigraphie séquentielle. 299 p., 14 pl., 156 fig. Thèse de l'Université de Neuchâtel (Suisse).	épuisé
T.25	BLANC (E.)1996. - Transect plate-forme - bassin dans les séries carbonatées du Berriasien supérieur et du Valanginien inférieur (domaines jurassien et nord-vocontien). Chronostratigraphie et transferts des sédiments. 311 p., 7 pl., 180 fig. Thèse d'Université. Grenoble I.	épuisé

T.26	LEMENNICIER (Y.) 1996. - Le complexe métamorphique du Sud Karakorum dans le secteur du Chogo Lungma (Baltistan - Nord Pakistan). Etude structurale, métamorphique, géochimique et radiochronologique. 171 p. Thèse d'Université. Grenoble I.	épuisé
T.27	CROUZET (C.) 1997. - Le thermopaleomagnétisme : méthodologie et applications. 197 p. Thèse de l'Université de Savoie.	150 F 22,87 €
T.28	LAZARRE (J.) 1997. - Modélisation 3D de l'interface socle varisque-couverture alpine dans le massif du Pelvoux (Hautes-Alpes, France). Tectonique des socles et des bassins à la limite secondaire-Tertiaire. 201 p. Thèse d'Université. Lyon I.	170 F 25,92 €
T.29	FUDRAL (S.) 1998. - Étude géologique de la suture téthysienne dans les Alpes franco-italiennes nord-occidentales, de la Doire Ripaire (Italie) à la région de Bourg Saint-Maurice (France). 306 p. Thèse de l'Université de Savoie.	275 F 41,92 €
T.30	CHAPRON (E.) 1999 - Contrôles climatique et sismo-tectonique de la sédimentation lacustre dans l'Avant-Pays alpin (Lac du Bourget, Léman) durant le quaternaire récent. 261 p. Thèse de l'Université de Lille.	240 F 36,59 €
T.31	Les Paléoalpins - Hommage à Pierre Bintz. 239 p.	250 F 38,11 €
T.32	DENIAUD (Y.) 2000 - Enregistrements sédimentaire et structural de l'évolution géodynamique des Andes équatoriennes au cours du Néogène : étude des bassins d'avant-arc et bilans de masse. 157 p. Thèse d'Université Grenoble I.	160 F 24,39 €
T.33	BERNAUS (J.-M.) 2000 - L'Urgonien du bassin d'Organyà (NE de l'Espagne) : micropaléontologie, sédimentologie et stratigraphie séquentielle 138 p. Thèse d'Université Grenoble I.	150 F 22,87 €
T.34	MASCLE (G.) et TRICART (P.) 2001 - Le Cnarl de Sardaigne : les plongées CYANA 166 p.	250 F 38,11 €

GÉOLOGIE ALPINE BULLETIN

du	T. 33	1956	au	T. 55	1979	30 FF	3,05 €	l'exemplaire
du	T. 57	1981	au	T. 69	1993	50 FF	7,62 €	l'exemplaire
sont épuisés	T. 56	1980	et	T. 61	1985			
	T. 70	1994		100 FF	15,24 €			l'exemplaire
	T. 71	1995		100 FF	15,24 €			l'exemplaire
	T. 72	1996		100 FF	15,24 €			l'exemplaire
	T. 73	1997		130 FF	19,82 €			l'exemplaire
	T. 74	1998		130 FF	19,82 €			l'exemplaire
	T. 75	1999		150 FF	22,87 €			l'exemplaire

T 70 1994 = 3 articles géologie alpine + Thèse d'Université TALAVERA MENDOZA O., p. 47-242.
T 71 1995 = 5 articles géologie alpine + Thèse d'Université BENITEZ S., p. 3-163.

La liste des sommaires des bulletins est fournie sur demande adressée au Service Documentation de l'Institut Dolomieu
Voir aussi sur le Web <http://www.univ-savoie.fr/labos/lga/produ>

GÉOLOGIE ALPINE SÉRIE SPÉCIALE "COLLOQUES ET EXCURSIONS"

N°1	Géoatelier Alpin. Résumés.	Grenoble, 12-13 Novembre 1992. 105 p.	50 F 7,62 €
N°2	Mesure de la déformation récente et actuelle. Résumés.	Chambéry 18-19 Mai 1993. 54 p.	épuisé
N°3	ODP Leg 143 post-cruise meeting. Field-trip.	Grenoble, 1-4 Juillet 1993. 106 p.	50 F 7,62 €
N°4	Les Bassins d'avant-chaînes. Résumés. Séance de la Société Géologique de France.	Grenoble, 21-22 Novembre 1994. 111 p.	épuisé

AUTRES

Fichier ORBITOLINIDAE par A. ARNAUD-VANNEAU 1978. Ed. SNEA(P). Types figurés -143 espèces 250 F 38,11 €

CONDITIONS DE VENTE

Les prix indiqués sont à majorer des frais d'expédition. Prix préférentiels pour commande en nombre, nous consulter.

Adressez vos demandes à : Institut de Géologie - Association Dolomieu. Documentation
15, rue Maurice Gignoux 38031 Grenoble cedex (France)
Tel : 04 76 63 59 76 Fax : 04 76 87 82 43 E-mail : ptalour@ujf-grenoble.fr

